

Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e  
Energia



**Avaliação do potencial eólico em meio urbano**  
**Aplicação a um caso de estudo em Telheiras**

**Gerardo Ibelli**

Dissertação  
Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

**2013**

---



Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e  
Energia



**Avaliação do potencial eólico em meio urbano**  
**Aplicação a um caso de estudo em Telheiras**

**Gerardo Ibelli**

Dissertação  
Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Orientador: Professor Doutor Fernando Marques da Silva

**2013**

---



# RESUMO

As preocupações ambientais e os respectivos compromissos, bem como o desempenho energético do país, induzem uma mudança no paradigma energético, tornando-se crucial o aproveitamento de recursos renováveis locais. A microgeração eólica urbana apresenta um elevado potencial de exploração, quer em termos de instalação de turbinas de pequena capacidade, quer em termos da sua integração em edifícios. Sendo um sector inovador, a penetração destas tecnologias no mercado não é isenta de desafios. Casos de estudo recentes demonstram baixas eficiências de sistema, quer ao nível da produção energética, quer ao nível económico, resultando numa perda de confiança por parte dos utilizadores. Os grandes períodos de retorno do investimento são atribuíveis, na maioria dos casos, à carência duma correta caracterização prévia do recurso eólico. As características pouco favoráveis do escoamento no meio-urbano, principalmente os baixos valores de velocidade e o regime turbulento, incidem directamente sobre a produção energética e sobre o tempo de vida útil das turbinas, logo sobre a economia do sistema. Outro aspecto a ter em consideração reside no facto de as curvas de potência indicadas pelos fornecedores das turbinas não serem obtidas a partir de um processo padrão virado a sua verificação.

O objectivo desta tese consiste em quantificar o potencial de uma área urbana para a produção de energia a partir de micro-turbinas eólicas. Tomou-se como caso de estudo um complexo de edifícios localizados na zona de Telheiras, em Lisboa, que incorpora uma variedade de características topográficas com forte incidência no escoamento. A caracterização do escoamento, virada à identificação dos pontos mais favoráveis para o aproveitamento da energia cinética do vento, foi realizada utilizando um modelo numérico, CFD, validado mediante comparação dos resultados com ensaios experimentais em túnel de vento, realizados nos laboratórios do LNEC.



# ABSTRACT

Environmental concerns and the energy performance of the country induce a change in the energy paradigm, based on the use of local renewable resources. Urban wind microgeneration has a high potential for exploration, both in terms of turbine installation of small capacity and integration in buildings. As an innovative sector, the penetration of these technologies in the market has its challenges. Recent studies demonstrate lower system efficiencies, both in terms of energy production and economic level, resulting in a loss of confidence among users. The big payback periods are attributable, in most cases, to the lack of a correct preliminary characterization of the wind resource. The unfavorable characteristics of the flow in urban environment, mainly low values of velocity and turbulent regime, directly affect energy production and the lifetime of the turbines, than the economy of the system. Another aspect to consider is that, usually, the power curves indicated by the suppliers of turbines are not obtained from a standard process of verification.

The aim of this thesis is to quantify the potential of an urban area for the production of energy from wind micro-turbines. A case study of a complex of buildings located in Telheiras, in Lisbon, was investigated, which incorporates a variety of topographical features affecting the flow. The characterization of the flow, useful to identify the most favorable points for kinetic energy extraction, was carried out using a numerical model, CFD, validated by comparison with experimental results of wind tunnel tests performed in LNEC.





# Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Definição de pequenas turbinas eólicas.....	1
1.2	O mercado das pequenas turbinas eólicas .....	2
1.3	As barreiras de mercado .....	3
1.4	O sistema de microprodução português.....	4
2	A teoria das turbinas eólicas .....	6
2.1	A potência extraível do vento .....	6
2.2	As turbinas de eixo vertical e de eixo horizontal .....	7
2.3	As turbinas de sustentação e de arrastamento .....	8
2.4	Análise aerodinâmica da pá .....	11
2.5	Sistemas de regulação.....	13
2.6	Impacte Ambiental .....	14
2.6.1	Ruído .....	14
2.6.2	<i>Flicker</i> visual e <i>Flashing</i> .....	15
2.6.3	Interferência electromagnética.....	16
2.6.4	Segurança pública .....	16
2.6.5	Biodiversidade e avifauna .....	16
2.6.6	Impacte visual .....	17
3	O Recurso Eólico .....	18
3.1	A circulação atmosférica .....	18
3.1.1	As escalas de movimento .....	20
3.1.2	A análise espectral.....	20
3.2	A Camada Limite Atmosférica .....	22
3.2.1	Os Modelos Matemáticos .....	22
3.3	A Camada Limite Urbana.....	25
3.3.1	A Subcamada de Rugosidade .....	30
3.4	O escoamento em torno de edifícios .....	32
3.4.1	Edifícios isolados .....	33
3.4.2	Os Desfiladeiros Urbanos .....	36
3.5	Turbulência.....	37
3.6	A Análise Estatística.....	38
4	As Turbinas Eólicas Urbanas .....	42

4.1	<i>Building-Augmented Wind Turbines (BAWT)</i> .....	42
4.1.1	<i>BAWT</i> perto de edifícios.....	43
4.1.2	<i>BAWT</i> entre edifícios com perfil aerodinâmico .....	44
4.1.3	<i>BAWT</i> integradas nas fachadas de edifícios.....	44
4.2	Modelos existentes de turbinas eólicas urbanas .....	46
4.2.1	As tendências do mercado europeu .....	46
4.2.2	Exemplos de turbinas urbanas .....	48
4.3	Regulamentos e Certificação.....	51
5	O caso de estudo .....	53
5.1	Caracterização da área de estudo .....	53
5.2	Metodologia .....	54
6	<i>CFD</i> .....	57
6.1	O <i>software</i> de simulação <i>ENVI-met</i> .....	57
6.1.1	O modelo tridimensional.....	57
6.1.2	O modelo atmosférico.....	59
6.2	O modelo <i>ENVI-met</i> .....	61
6.2.1	Caso 1: Torre com direcção do vento Norte .....	62
6.2.2	Caso 2: Escola com direcção do vento Norte .....	63
6.2.3	Caso 3: Torre com direcção do vento Sul.....	64
6.2.4	Caso 4: Escola com direcção do vento Sul .....	65
7	Túnel de Vento .....	66
7.1	O Túnel Aerodinâmico de Camada Limite do LNEC .....	66
7.2	A simulação da CLA .....	67
7.3	A medição dos perfis de vento em altura .....	68
7.4	O modelo físico.....	70
7.5	Definição da CLA para a área de estudo .....	71
7.6	Metodologia de ensaio.....	72
7.6.1	Perfil vertical de velocidade da CLA .....	74
7.6.2	Caso 1: Torre com direcção do vento Norte .....	75
7.6.3	Caso 2: Escola com direcção do vento Norte .....	77
7.6.4	Caso 3: Torre com direcção do vento Sul.....	79
7.6.5	Caso 4: Escola com direcção do vento Sul .....	81
7.7	Validação .....	82
8	Avaliação do potencial.....	84

9	Estimativa da produção .....	91
9.1	Normais Climatológicas.....	91
9.2	Turbina <i>T-Urban</i> .....	93
9.3	Torre 1 .....	93
9.4	Torre 2 .....	95
9.5	Torre 3 .....	96
9.6	Banda Z.....	97
9.7	Banda G1 .....	98
9.8	Banda G2 .....	99
9.9	Conclusões.....	100
10	Notas finais .....	101



# Lista de Figuras

Fig. 1-1 Numero de pequenas turbinas eólicas instaladas no mundo por país (excluindo Itália e Índia), no final de 2011 (WWEA, 2013).	2
Fig. 1-2 Capacidade total instalada no mundo de pequenas turbinas eólicas por país, até 2011 (WWEA, 2013).	3
Fig. 1-3 Previsão da capacidade instalada global de pequenas turbinas eólicas até 2020 (WWEA, 2013).	3
Fig. 2-1 Representação gráfica de turbinas Darrieus e H-rotor (Beller, 2009).	8
Fig. 2-2 Exemplo de turbina de resistência (Mertens, Wind Energy in the Built Environment. Concentrator Effects of Buildings., 2006).	9
Fig. 2-3 Tubo de fluxo segundo a teoria do disco actuador de Rankine-Froude (ABB, 2011).	9
Fig. 2-4 Representação gráfica das componentes do vento agentes sobre a pá (ABB, 2011).	11
Fig. 2-5 (Esquerda) Representação gráfica das forças agentes sobre a secção transversal da pá (ABB, 2011).	12
Fig. 2-6 (Direita) Exemplo de curva $\lambda$ -C <sub>p</sub> (ABB, 2011).	12
Fig. 3-1 Vento de gradiente em regime anticiclónico e ciclónico (SACE, 2011).	19
Fig. 3-2 Espectro de energia do vento elaborado por Van Der Hoven (Spera, 1994).	21
Fig. 3-3 Perfil vertical da velocidade média do vento típico (ABB, 2011).	23
Fig. 3-4 Efeito da rugosidade sobre o perfil vertical da velocidade média do vento (ABB, 2011).	24
Fig. 3-5 Perfil vertical da velocidade média na CLU (Mertens, 2006).	26
Fig. 3-6 Modelo teórico da variação de d/H e z <sub>0</sub> /H com a densidade superficial (Macdonald, Griffiths, & Hall, 1998).	27
Fig. 3-7 Regimes típicos do escoamento na CLU em função da densidade dos elementos de rugosidade: (a) isolado, (b) interferente, (c) rasante (Best, et al., 2008).	27
Fig. 3-8 Estrutura da CLU (Best, et al., 2008).	29
Fig. 3-9 Perfis verticais da velocidade média do vento em correspondência de uma mudança de rugosidade (área rural e área urbana) (Mertens, 2006).	30
Fig. 3-10 Perfil vertical normalizado da velocidade do vento no meio urbano (Heat & Walshe, 2007).	31
Fig. 3-11 Linhas de corrente obtidas em CFD para um corpo fuselado (esquerda) e um corpo rombo (direita).	33
Fig. 3-12 Zona de recirculação a jusante de um elemento cubico exposto ao escoamento (Best, et al., 2008).	34
Fig. 3-13 Efeito de aceleração nas bordas da fachada exposta ao escoamento.	34
Fig. 3-14 Altura do ponto de estagnação do escoamento incidente sobre a fachada de um edifício (Mertens, 2006).	36
Fig. 3-15 (Esquerda) Histograma da frequência de ocorrência da velocidade média do vento. (Direita) Histograma da probabilidade acumulada da velocidade média do vento (ABB, 2011).	39
Fig. 3-16 (Esquerda) Influência do parâmetro de forma sobre a função de distribuição de Weibull. (Direita) Influência do parâmetro de escala sobre a função de distribuição de Weibull (ABB, 2011).	40
Fig. 4-1 Representações artísticas das três configurações elementares de <i>Building-Augmented Wind Turbines</i> . Da esquerda: <i>BAWT</i> sobre a cobertura de um edifício; <i>BAWT</i> entre edifícios com perfil aerodinâmico; <i>BAWT</i> integrada na fachada do edifício.	43
Fig. 4-2 Projecto WEB, Universidade de Estugarda.	46
Fig. 4-3 Curvas C <sub>p</sub> -v de diferentes modelos de turbinas eólicas urbanas.	51
Fig. 5-1 Vista aérea de uma parcela do Bairro de Telheiras em Lisboa, obtida pelo Google Earth.	53
Fig. 5-2 Vista aérea da área de estudo com subdivisão em células, obtida pelo <i>Google Earth</i> .	54
Fig. 5-3 Imagem do Google Earth da vista aérea da área de estudo com indicação dos pontos de ensaio.	56
Fig. 6-1 Representação esquemática do modelo principal no ENVI-met (Bruse, 2009).	57
Fig. 6-2 Diferentes configurações de malhas verticais: (A) equidistante; (B1) telescópica, (B2) mista (Bruse, 2009).	58
Fig. 6-3 Modelo tridimensional da área de estudo, obtido pelo <i>ENVI-met</i> .	61
Fig. 6-4 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 1 obtido pelo <i>ENVI-met</i> . (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 1 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo <i>ENVI-met</i> .	62
Fig. 6-5 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 1 obtido pelo <i>ENVI-met</i> .	62
Fig. 6-6 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 2 obtido pelo <i>ENVI-met</i> . (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 2 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo <i>ENVI-met</i> .	63

Fig. 6-7 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 2 obtido pelo ENVI-met. ....	63
Fig. 6-8 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 3 obtido pelo ENVI-met. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 3 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ENVI-met. ....	64
Fig. 6-9 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 3 obtido pelo ENVI-met. ....	64
Fig. 6-10 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 4 obtido pelo ENVI-met. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 4 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ENVI-met. ....	65
Fig. 6-11 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 4 obtido pelo ENVI-met. ....	65
Fig. 7-1 (Esquerda) Vista exterior da câmara de pleno do túnel aerodinâmico do LNEC. (Direita) Vista interior da abertura de entrada do ar exterior do túnel aerodinâmico do LNEC. ....	66
Fig. 7-2 Vista interior da câmara de pleno do túnel aerodinâmico do LNEC. ....	66
Fig. 7-3 Elementos de separação para a simulação da CLA (Irwin, 1981). ....	67
Fig. 7-4 Representação esquemática do tubo de Pitot-Prandtl (Skilltech). ....	69
Fig. 7-5 Imagem do modelo físico da área de estudo. ....	70
Fig. 7-6 Elementos passivos de rugosidade e turbulência na câmara do túnel de vento. ....	72
Fig. 7-7 (Esquerda) Tubo de Pitot-Prandtl no tecto do túnel de vento. (Direita) Tubo de Pitot-Prandtl de referência. ....	73
Fig. 7-8 (Esquerda) Tubo de Pitot-Prandtl no modelo físico. (Direita) Ventiladores do túnel de vento. ....	73
Fig. 7-9 Comparação dos perfis verticais de velocidade do fluxo a entrada, obtidos pelo ensaio e pelo CFD. ....	74
Fig. 7-10 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 1 obtido pelo ensaio. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 1 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ensaio. ....	76
Fig. 7-11 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 1 obtido pelo ensaio. ....	76
Fig. 7-12 Comparação entre os perfis verticais de velocidade normalizados para o Caso 1 obtidos pelo ensaio e pelo CFD. ....	76
Fig. 7-13 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 2 obtido pelo ensaio. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 2 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ensaio. ....	77
Fig. 7-14 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 2 obtido pelo ensaio. ....	78
Fig. 7-15 Comparação entre os perfis verticais de velocidade normalizados para o Caso 2 obtidos pelo ensaio e pelo CFD. ....	78
Fig. 7-16 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 3 obtido pelo ensaio. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 3 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ensaio. ....	80
Fig. 7-17 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 3 obtido pelo ensaio. ....	80
Fig. 7-18 Comparação entre os perfis verticais de velocidade normalizados para o Caso 3 obtidos pelo ensaio e pelo CFD. ....	80
Fig. 7-19 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 4 obtido pelo ensaio. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 4 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ensaio. ....	81
Fig. 7-20 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 4 obtido pelo ensaio. ....	82
Fig. 7-21 Comparação entre os perfis verticais de velocidade normalizados para o Caso 2 obtidos pelo ensaio e pelo CFD. ....	82
Fig. 7-22 Perfis verticais de vento normalizados na Escola, para todas as direcções principais. ....	83
Fig. 8-1 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Norte, obtida pelo ENVI-met. ....	85
Fig. 8-2 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Norte, obtida pelo ENVI-met. ....	85
Fig. 8-3 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Nordeste, obtida pelo ENVI-met. ....	86
Fig. 8-4 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Nordeste, obtida pelo ENVI-met. ....	86
Fig. 8-5 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Este, obtida pelo ENVI-met. ....	86
Fig. 8-6 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Este, obtida pelo ENVI-met. ....	87
Fig. 8-7 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Sudeste, obtida pelo ENVI-met. ....	87
Fig. 8-8 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Sudeste, obtida pelo ENVI-met. ....	87

Fig. 8-9 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Sul, obtida pelo ENVI-met. ....	88
Fig. 8-10 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Sul, obtida pelo ENVI-met. ....	88
Fig. 8-11 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Sudoeste, obtida pelo ENVI-met. ....	88
Fig. 8-12 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Sudoeste, obtida pelo ENVI-met. ....	89
Fig. 8-13 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Oeste, obtida pelo ENVI-met. ....	89
Fig. 8-14 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Oeste, obtida pelo ENVI-met. ....	89
Fig. 8-15 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Noroeste, obtida pelo ENVI-met. ....	90
Fig. 8-16 Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Noroeste, obtida pelo ENVI-met. ....	90
Fig. 9-1 Vista aérea da área de estudo com indicação dos pontos onde se estimou a produção de energia eólica, obtida pelo <i>Google Earth</i> . ....	91
Fig. 9-2 Rosa de ventos com base nas Normais Climatológicas para Lisboa (Instituto de Meteorologia - estação meteorológica do Aeroporto, período 1985-1997). ....	92
Fig. 9-3 Função de densidade de probabilidade de Weibull para Lisboa ( $U_{10}=3,09\text{m/s}$ $A=3,49\text{m/s}$ ; $k=2,00$ ). ....	92
Fig. 9-4 Curva de potência da turbina eólica T-Urban (INETI). ....	93
Fig. 9-5 Perfis verticais de velocidade normalizados na Torre 1, relativos a todas as direcções. ....	94
Fig. 9-6 Perfis verticais de velocidade normalizados na Torre 2, relativos a todas as direcções. ....	95
Fig. 9-7 Perfis verticais de velocidade normalizados na Torre 3, relativos a todas as direcções. ....	96
Fig. 9-8 Perfis verticais de velocidade normalizados na Banda Z, relativos a todas as direcções. ....	97
Fig. 9-9 Perfis verticais normalizados na Banda G1, relativos a todas as direcções. ....	98
Fig. 9-10 Perfis verticais normalizados na Banda G2, relativos a todas as direcções. ....	99





## Lista de Tabelas

Tab. 2-1 Comparação entre turbinas a eixo vertical (VAWT) e a eixo horizontal (HAWT) .....	8
Tab. 3-1 Valores típicos do comprimento de rugosidade, para vários tipos de superfície (Manwell, McGowan, & Rogers, 2002). .....	24
Tab. 3-2 Valores típicos do comprimento de rugosidade, para vários tipos de superfície (Manwell, McGowan, & Rogers, 2002). .....	28
Tab. 3-3 Modelos analíticos para o cálculo do comprimento, altura e largura da zona de recirculação. ....	35
Tab. 3-4 Descrição das características da zona de recirculação nos Street Canyons em função de diferentes valores da relação de forma (Sini, Anquetin, & Mestayer, 1996). ....	37
Tab. 4-1 Relação entre a energia produzida por diferentes configurações de BAWT e as turbinas equivalentes postas à mesma altura, mas não vinculadas a nenhum edifício, por diferentes tipologias de vento (Stankovic, Campbell, & Harries, 2009).....	45
Tab. 4-2 Análise comparativa dos principais dados técnicos apresentados no Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers, relativos a 52 modelos de turbinas eólicas urbanas presentes no mercado em 2005.....	47
Tab. 7-1 Dados definitivos de dimensionamento dos pináculos (Castanho, 2012). ....	71
Tab. 7-2 Valores médios da pressão total, estática e dinâmica e da velocidade, no ponto de referência obtidos nos ensaios. ....	74
Tab. 7-3 Resultados do ensaio na Torre com direcção do vento Norte. ....	75
Tab. 7-4 Resultados do ensaio na Escola com direcção do vento Norte. ....	77
Tab. 7-5 Resultados do ensaio na Torre com direcção do vento Sul. ....	79
Tab. 7-6 Resultados do ensaio na Escola com direcção do vento Sul. ....	81
Tab. 9-1 Energia anual produzida pela turbina na Torre 1, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.....	94
Tab. 9-2 Energia anual produzida pela turbina na Torre 2, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.....	95
Tab. 9-3 Energia anual produzida pela turbina na Torre 3, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.....	96
Tab. 9-4 Energia anual produzida pela turbina na Banda Z, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura. ....	97
Tab. 9-5 Energia anual produzida pela turbina na Banda G1, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.....	98
Tab. 9-6 Energia anual produzida pela turbina na Banda G2, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.....	99



# 1 Introdução

---

A actual crise energética e as implicações sócio-ambientais que dela advêm incitam a utilização de energias renováveis. Estas surgem como resposta às necessidades da sociedade em termos de qualidade, segurança e redução dos danos ambientais. A energia eólica é uma das energias endógenas, gratuita e com possibilidade de responder à procura. Hoje em dia, a maior aplicação de energia eólica é a geração eléctrica de larga escala mediante parques eólicos ligados à rede.

Em particular nos países em desenvolvimento, o recurso a sistemas isolados com pequena capacidade representa uma válida e eficiente solução ao problema da segurança de abastecimento energético em áreas remotas. Nas áreas com acesso a rede eléctrica, a energia eólica de pequena escala tem sido aplicada em vários sectores como por exemplo a iluminação estradal, a aquicultura e a dessalinização das águas do mar. Com a introdução das redes inteligentes (*Smart Grids*), surge ainda um novo paradigma, que assenta na produção de forma distribuída. Esta geração de energia, na qual o consumidor passa a ter também o papel de produtor, é denominada microgeração. Para além de recorrer a energias limpas, a produção é efectuada junto do local de consumo, evitando perdas de energia durante o transporte e reduzindo a factura energética dos edifícios. Contudo, a indústria das pequenas turbinas eólicas está em fase de desenvolvimento e esconde um grande potencial ainda pouco explorado.

## 1.1 Definição de pequenas turbinas eólicas

Originariamente, as pequenas turbinas eólicas ( $SWT^1$ ) eram definidas com base na característica de produzir pequenas quantidades de energia eléctrica, contribuindo para a satisfação das necessidades domésticas. Sendo os padrões de consumo variáveis de país para país, surgiu a necessidade de chegar a uma definição mais específica e aplicável a nível universal. A Comissão Electrotécnica Internacional TC88 definiu no *International Standard IEC 61400-2 (Design requirements for small wind turbines)*, que as pequenas turbinas eólicas são caracterizadas por um área de varrimento até aos  $200m^2$  (correspondente a diâmetros de cerca  $16m$ ), e potências nominais abaixo dos  $50kW$ , para tensões inferiores a  $1000V$  em AC, ou  $1500V$  em DC. Contudo, em muitos países foram sendo definidos limites próprios de capacidade, e por vezes as características técnicas e os parâmetros prestacionais, que permitissem classificar as pequenas turbinas eólicas. Na maioria dos casos os resultados obtidos são discordantes, pelo que, ainda hoje, se torna difícil encontrar uma definição de carácter universal. O valor máximo de capacidade nominal que define as pequenas turbinas

---

<sup>1</sup> *Small Wind Turbines.*

eólicas pode variar de 15 até 100kW, conforme o país considerado. A *World Wind Energy Association*, de forma a facilitar a comparação de dados relativos aos diversos países, estabelece como capacidade nominal limite o valor de 100kW.

## 1.2 O mercado das pequenas turbinas eólicas

Nos últimos anos tem-se assistido a um forte crescimento do mercado de pequenas<sup>2</sup> turbinas eólicas. No final de 2011, foram contabilizadas 730.000 unidades em todo o mundo (excluindo o mercado italiano e indiano), das quais cerca de 10% foram instaladas no mesmo ano (*Fig.1.1*). O mercado chinês representa cerca de 68% do mercado mundial total com mais de 500.000 unidades instaladas, seguido dos Estados Unidos de América e Reino Unido (WWEA, 2013).

Em termos de capacidade, a potência instalada atingiu 576MW a nível mundial (*Fig.1.2*). Desta, cerca de 40% pertence à China e cerca de 35% aos EUA. Mais de 120MW foram instalados em 2011 (cerca de 27% da capacidade total), que correspondem ao dobro da potência instalada no ano anterior (WWEA, 2013).

Observa-se também um aumento global em termos de potência média das unidades instaladas globais: em 2010 o seu valor era de 0,66kW, enquanto em 2011 cresceu até 0,77kW. A potência instalada média das pequenas turbinas instaladas apenas em 2011 é de 1,6kW.

Particularmente nos países em desenvolvimento predominam os sistemas não ligados à rede ou ligados a micro-redes. A microgeração eólica em áreas sem acesso à rede eléctrica nacional constitui uma alternativa economicamente competitiva.

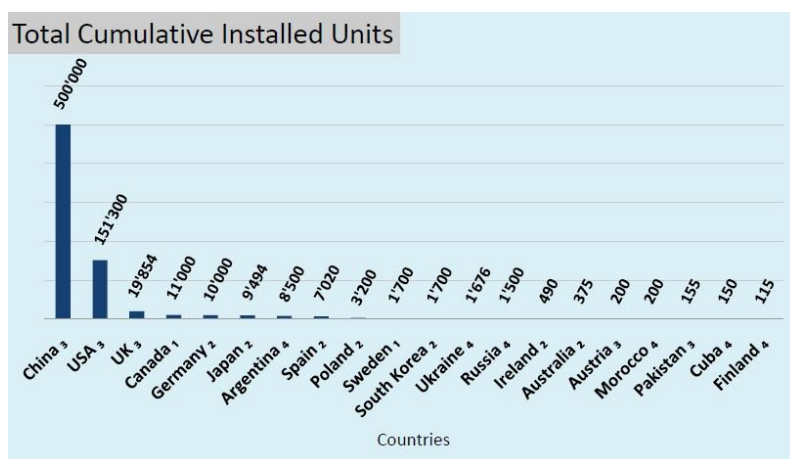


Fig. 1-1 Numero de pequenas turbinas eólicas instaladas no mundo por país (excluindo Itália e Índia), no final de 2011 (WWEA, 2013).

<sup>2</sup> Capacidade nominal até 100kW (WWEA, 2013).

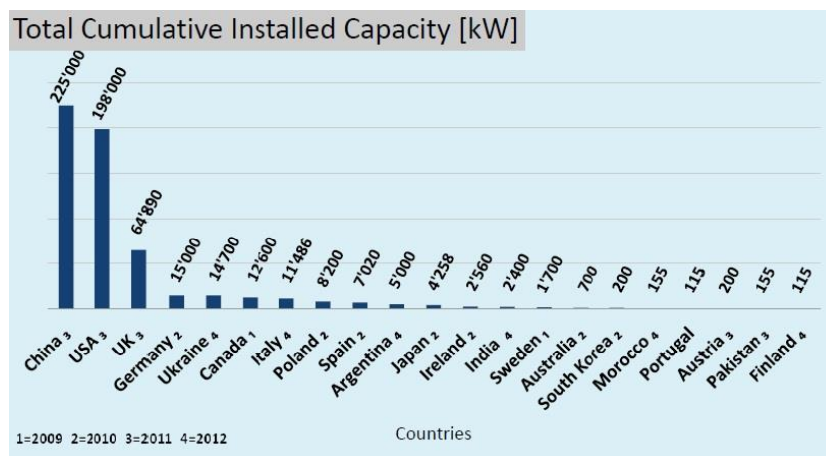


Fig. 1-2 Capacidade total instalada no mundo de pequenas turbinas eólicas por país, até 2011 (WWEA, 2013).

A *World Wind Energy Association* publicou, no seu relatório anual, uma análise da possível evolução do mercado até 2020, baseada nos padrões de crescimento do mercado observados nos últimos anos e na opinião de especialistas da indústria eólica, para os quais existem analogias com a evolução do mercado fotovoltaico. Como mostra a *Figura 1.3*, a taxa de crescimento registada nos últimos tempos deverá continuar até 2015, atingindo a capacidade anual instalada de 400MW. Dentro deste período, os países e as associações internacionais serão capazes de estabelecer regulamentos e políticas mais rigorosas para regular o mercado e suportar os investimentos. A partir deste momento, prevê-se uma taxa de crescimento de 20%, que levará a uma capacidade instalada global de 5GW em 2020, e uma capacidade global instalada anualmente de 1000MW.

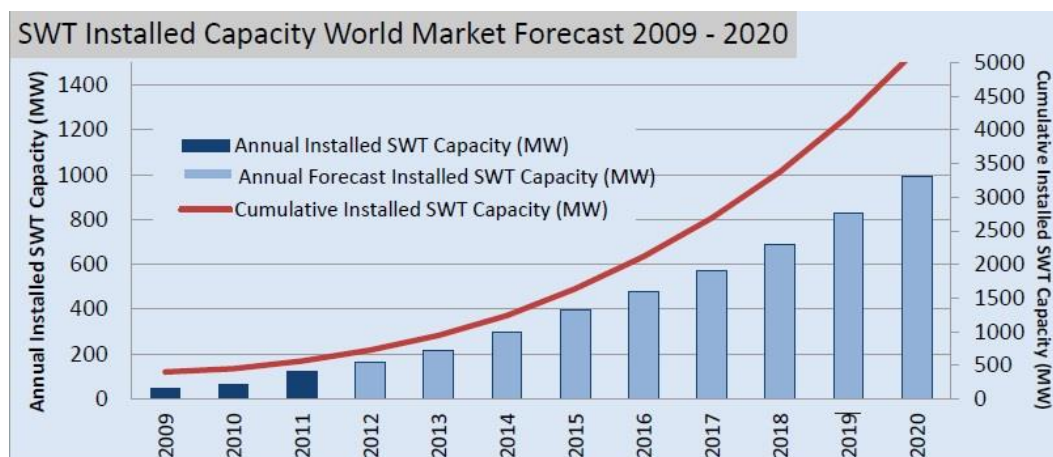


Fig. 1-3 Previsão da capacidade instalada global de pequenas turbinas eólicas até 2020 (WWEA, 2013).

### 1.3 As barreiras de mercado

A principal barreira de mercado é representada pelos custos. Sendo uma indústria em expansão, estima-se que a economia de escala ajudará a reduzir substancialmente os custos

de produção, ainda muito onerosa. A disseminação da tecnologia é limitada também pelos elevados custos associados ao processo de certificação e as metodologias utilizadas para a avaliação do recurso eólico, que representam instrumentos necessários para o controlo e o melhoramento da qualidade do produto.

Como muitas outras tecnologias baseadas em energias renováveis, também o futuro do mercado das pequenas turbinas eólicas depende das políticas de incentivo e esquemas de suporte apropriados e estáveis, como a *Feed-in Tariff*<sup>3</sup>, *Net Metering*<sup>4</sup>, financiamentos e subsídios nacionais. Enquanto os financiamentos e subsídios nacionais incentivam apenas a venda dos equipamentos, os sistemas de *Feed-in Tariff* e *Net Metering* promovem a geração de energia e o melhoramento da eficiência dos sistemas, resultando em instrumentos mais eficazes para o crescimento da indústria.

## 1.4 O sistema de microprodução português

A produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência possui enormes vantagens em termos não só ambientais como também económicos e tecnológicos, tais como:

- equilíbrio de forma dinâmica dos mercados de electricidade, podendo produzir mais nos períodos de grande procura e menos quando há pouca procura;
- contribuição para a redução da forte dependência energética do sistema energético português relativamente ao exterior;
- redução das perdas de energia na rede de distribuição eléctrica;
- criação de oportunidades para a indústria portuguesa de bens e equipamentos para o sector eléctrico, assim como empregos;
- aumento da autonomia e do poder de decisão dos consumidores individuais e das comunidades locais;
- especialmente em locais cuja rede eléctrica tem fraca capacidade de recepção de produção eléctrica, ou que a rede eléctrica não alcança, as pequenas turbinas eólicas podem constituir uma alternativa favorável.

Os pontos expostos anteriormente denotam a importância da criação de oportunidades para este tipo de produção de energia, com a implementação legal de incentivos por parte do Estado.

---

<sup>3</sup> A energia produzida através de sistemas de microprodução ligados à rede eléctrica nacional é paga pela companhia de energia eléctrica a uma tarifa que varia conforme com o estabelecido na regulamentação nacional. Os produtores continuam a pagar pela energia consumida.

<sup>4</sup> A energia produzida através de sistemas de microprodução ligados à rede eléctrica nacional é utilizada pelo próprio produtor. Eventuais excedentes de produção são injectadas na rede, podendo ser pagas pela companhia de energia eléctrica, ou utilizadas futuramente.

Em Portugal existem dois regimes jurídicos relativos à produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência. Um relativo a instalações com potência até  $5,75kW$ , designadas por unidades de microprodução, e outro relativo a instalações com potência superior e até  $250kW$ , designadas por unidades de miniprodução.

A microprodução é regulada pelo Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de Novembro (sucessivamente modificado pelo Decreto-Lei n.º 118-A/2010, de 25 de Outubro, e o Decreto-Lei n.º 25/2013, de 19 de Fevereiro), que estabelece dois regimes remuneratórios: um regime geral e um regime bonificado.

O regime geral é aplicável a todos os produtores com potência de ligação limitada a 50% da potência já contratada no contrato de compra de electricidade a um máximo de  $5,75kW$ . O comercializador de último recurso compra a electricidade produzida em unidades de microprodução no âmbito do regime geral, remunerando-a de acordo com a seguinte fórmula:

$$Rem_M = W_M P_{ref} \frac{IPC_{n-1}}{IPC_{ref}} \quad [1.1]$$

Onde:

- $Rem_M$  = remuneração do mês M em [€];
- $P_{ref}$  = valor da parcela de energia da tarifa simples entre 2,30 e 20,7 kVA aplicada no ano de 2012 pelo comercializador de último recurso ao fornecimento da instalação de consumo;
- $IPC_{n-1}$  = índice de preços no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês de Dezembro de 2011, publicado pelo Instituto Nacional de Estatística, I.P;
- $IPC_{ref}$  = índice de preços no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês de Dezembro do ano n-1, publicado pelo Instituto Nacional de Estatística, I.P.

No regime remuneratório bonificado, a potência de ligação está limitada até  $3,68kW$  ( $11,04kW$  no caso de condomínios); o local de consumo associado à microprodução deve dispor de colectores solares térmicos com um mínimo de  $2m^2$  de área útil de colector ou de caldeira a biomassa com produção anual de energia térmica equivalente.

Segundo o artigo 11º do referido Decreto-Lei, a tarifa é aplicável durante um total de 15 anos, subdivididos em dois períodos, o primeiro com a duração de 8 anos e o segundo com a duração dos subseqüentes 7 anos. No final deste período, o produtor ingressa no regime remuneratório geral. A tarifa de referência é fixada em  $400 \text{ €/MWh}$  para o primeiro período e em  $240 \text{ €/MWh}$  para o segundo período, sendo o valor de ambas as tarifas sucessivamente reduzido anualmente em  $20 \text{ €/MWh}$ . A tarifa a aplicar varia consoante o tipo de energia primária utilizada, sendo determinada mediante a aplicação de determinadas percentagens (a solar é 100% e a eólica é 80%).

Com os incentivos referidos, os particulares podem produzir electricidade proveniente de sistemas de microgeração para a rede, no âmbito do regime bonificado, desde que seja respeitado o limite máximo legal estabelecido de  $4MWh$  por ano por cada kW instalado, para o caso da energia eólica.

## 2 A teoria das turbinas eólicas

---

A produção energética de uma turbina eólica é governada por um princípio fundamental:

- a potência gerada é proporcional ao cubo da velocidade do vento. Duplicando a velocidade do vento, a energia extraída pela turbina é oito vezes superior.

Neste capítulo, apresentar-se-ão os princípios que estão na base do funcionamento das turbinas eólicas. Será realizada uma análise teórica do desempenho em meio urbano das principais tipologias de turbinas eólicas existentes, apresentando vantagens e desvantagens. Sucessivamente serão evidenciadas as principais limitações que o ambiente urbano impõe, tentando individuar as características necessárias para a correcta integração destes sistemas.

### 2.1 A potência extraível do vento

A produção de energia eléctrica mediante turbinas eólicas depende da interacção entre as pás do rotor eólico e o vento. A energia cinética contida no vento é inicialmente convertida em energia mecânica de rotação, depois em energia eléctrica, através da ligação a um gerador eléctrico.

A potência disponível no vento é dada por:

$$P_{incidente} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

[ 2.1 ]

Onde:

- $\rho$  = densidade do ar. Em condições padrão é igual a  $1,225 kg/m^3$  (ao nível do mar e temperatura igual a  $15^\circ C$ );
- $A$  = área varrida pelas pás do rotor eólico;
- $v$  = velocidade do vento.

A interacção do escoamento com as pás produz efeitos que se desenvolvem a partir de uma certa distancia a montante do plano de rotação do rotor, e não em correspondência dele, resultando na impossibilidade de converter completamente a energia cinética incidente em energia mecânica. Tipicamente, o cálculo da potência extraída é realizado mediante o coeficiente de potência  $C_p$ , dado pela razão entre potência extraível e potência incidente. Representa portanto a fracção máxima da energia contida no vento que pode ser extraída pela turbina:



$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$$

[ 2.2 ]

Segue que a potência extraível é igual a:

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3$$

[ 2.3 ]

Mesmo não sendo uma eficiência em sentido estrito, o coeficiente de potência é normalmente entendido como tal, sendo utilizado para comparar o desempenho de diferentes turbinas eólicas.

## 2.2 As turbinas de eixo vertical e de eixo horizontal

Uma primeira distinção entre os vários tipos de turbinas eólicas pode ser feita entre turbinas de eixo vertical (VAWT<sup>5</sup>) e turbinas de eixo horizontal (HAWT<sup>6</sup>). A principal diferença entre os dois tipos de sistemas consiste na capacidade de captar o vento de qualquer direcção. Enquanto esta característica é intrínseca para as turbinas de eixo vertical, as de eixo horizontal precisam ser orientadas na direcção do escoamento mediante estratégias que podem ser de tipo activo ou passivo. Um exemplo de tipo activo são os dispositivos que detectam a direcção do vento, associados a um motor que controla a orientação do rotor. De tipo passivo são as turbinas dotadas de uma asa posterior, vulgarmente dita “leme”, ou ainda aquelas cujo rotor é posicionado a jusante da torre, relativamente ao sentido do vento, denominadas como *downwind*.

Mesmo tendo a vantagem de captar o vento de qualquer direcção evitando a rotação da *nacelle*<sup>7</sup>, as turbinas VAWT apresentam alguma limitação. Na turbina de tipo *H-Rotor*, por exemplo, constituída por elementos verticais rectilíneos ligados ao eixo de rotação por braços transversais, as forças centrífugas dão origem a esforços de torsão elevados. Se por um lado este problema é resolvido com as turbinas de tipo *Darrieus*, constituídas por elementos curvilíneos de forma troposkiana, por outro não permitem o arranque automático da turbina (Fig.2.1). De facto, não é possível regular o ângulo entre o plano de rotação do eixo da pá e a corda máxima da sua secção, dito passo, permitindo à velocidade de rotação do rotor de atingir os valores mínimos de operação.

---

<sup>5</sup> *Vertical Axis Wind Turbine.*

<sup>6</sup> *Horizontal Axis Wind Turbine.*

<sup>7</sup> A *nacelle* (cabina) é o local onde se alojam os constituintes do aerogerador: gerador; veio secundário; caixa de velocidades; chumaceira; radiadores.

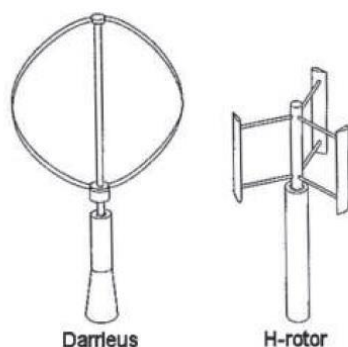


Fig. 2-1 Representação gráfica de turbinas Darrieus e H-rotor (Beller, 2009).

Tipicamente, para a geração de energia em larga-escala, utilizam-se turbinas a eixo horizontal com três pás, sendo, neste caso, a configuração mais eficiente. A geração em pequena escala carece de uma tendência bem definida, possivelmente por causa da maior complexidade do escoamento, bem como à pouca maturidade do sector.

Na tabela seguinte comparam-se as principais características das *VAWT* e das *HAWT*:

Tipo turbina	Necessidade de orientação ao vento	Resistente a elevada turbulência	Pouco ruído	Mais eficientes	Passo variável	Manutenção reduzida e mais fácil
<b>VAWT</b>	x	✓	✓	x	x	✓
<b>HAWT</b>	✓	x	x	✓	✓	x

Tab. 2-1 Comparação entre turbinas a eixo vertical (VAWT) e a eixo horizontal (HAWT)

## 2.3 As turbinas de sustentação e de arrastamento

A conversão da energia cinética em energia mecânica pode ser realizada através de rotores de sustentação ou de arrastamento.

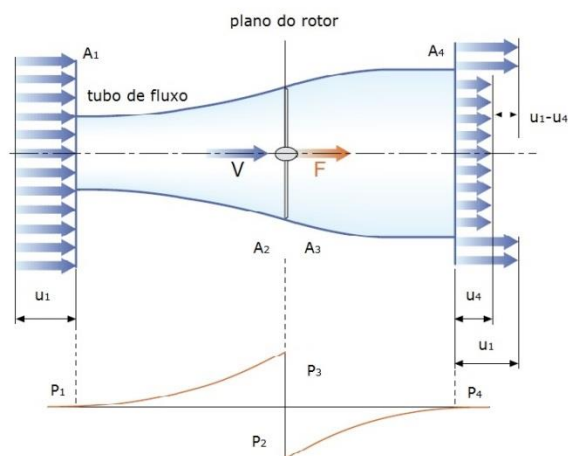
Numa turbina de arrastamento, a rotação tem origem na diferença entre as forças de arrastamento<sup>8</sup> que agem sobre os elementos rotativos. A *Figura 2.2* mostra um exemplo deste tipo de rotor. O elemento com a superfície convexa na direcção ao escoamento é o que está sujeito à força de arrastamento menor, pelo que dissipa energia, enquanto o elemento com a superfície côncava exposta ao escoamento é o que produz energia.

<sup>8</sup> Componente da Resultante Aerodinâmica paralela ao vento relativo. A Resultante Aerodinâmica (RA) é uma força que surge em virtude do diferencial de pressão entre o intradorso e o extradorso do perfil aerodinâmico.



**Fig. 2-2 Exemplo de turbina de resistência (Mertens, Wind Energy in the Built Environment. Concentrator Effects of Buildings., 2006).**

Para rotores de sustentação, a rotação dos elementos rotativos (neste caso pás) é dada pela acção da força de sustentação<sup>9</sup>. O coeficiente de potência máximo obtém-se através da Lei de Betz, baseada na teoria do disco atuador de Rankine-Froude (Manwell, McGowan, & Rogers, 2002). O disco actuador, assimilável a um rotor com um número infinito de pás e resistência aerodinâmica desprezável, é definido como uma superfície com dimensão axial infinitamente pequena, sobre a qual age uma força axial, e que determina uma descontinuidade na pressão do fluido que o atravessa, logo uma redução de velocidade. O disco actuador é situado num tubo de fluxo, cujas entrada e saída encontram-se em planos infinitamente distantes do disco, e são caracterizados por valores de pressão iguais à pressão atmosférica (*Fig. 2.3*). Considera-se também que o fluido seja homogêneo e incompressível e que não existam efeitos de rotação no escoamento.



**Fig. 2-3 Tubo de fluxo segundo a teoria do disco actuador de Rankine-Froude (ABB, 2011).**

Pela lei de conservação da quantidade de movimento e de conservação das massas ( $\dot{m} = \rho Au = Cte.$ ), a força axial escreve-se:

$$F = \dot{m}(u_1 - u_4)$$

[ 2.4 ]

<sup>9</sup> Componente da Resultante Aerodinâmica perpendicular ao vento relativo.

A força axial pode ser também vista como a resultante das forças de pressão que agem sobre ambas as superfícies do disco atuador:

$$F = A_2(p_2 - p_3) \quad [2.5]$$

Aplicando o teorema de Bernoulli entre as secções 1-2 e entre as secções 3-4, e substituindo na [2.6] tendo em consideração que  $p_1 = p_4$  e que  $u_2 = u_3$ , obtém-se:

$$F = \frac{1}{2} \rho A_2 (u_1^2 - u_4^2) \quad [2.6]$$

Igualando as duas expressões da força axial encontradas e simplificando, resulta que a velocidade no plano do rotor é igual à média aritmética das velocidades à entrada e à saída do tubo de fluxo:

$$u_2 = \frac{u_1 + u_4}{2} \quad [2.7]$$

Definindo o coeficiente de interferência axial no escoamento  $a$ , como a taxa de decaimento da velocidade entre as secções 1 e 2, a velocidade no plano do disco pode ser vista como a combinação da velocidade do escoamento livre e da velocidade induzida, pelo que  $u_2 = u_1(1 - a)$ . Substituindo na [2.7], obtém-se:

$$u_4 = u_1(1 - 2a) \quad [2.8]$$

Esta relação mostra que a velocidade induzida na secção de saída do tubo de fluxo é igual ao dobro do seu valor em correspondência do disco actuador.

Considerando que a potência extraível do escoamento se obtém multiplicando a força axial pela velocidade  $u_2$ , e substituindo na expressão anterior, resulta:

$$P = \frac{1}{2} \rho A u^3 4a(1 - a)^2 \quad [2.9]$$

Portanto o coeficiente de potência é igual a:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad [2.10]$$

A Lei de Betz define o valor máximo do coeficiente de potência, chamado Limite de Betz, impondo a sua derivada respeito ao coeficiente de interferência axial igual a zero, e obtendo como solução  $a = 1/3$ , pelo que:

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \approx 0,59$$

[ 2.11 ]

O limite de Betz indica que a máxima potência extraível do escoamento, por uma turbina ideal de sustentação não pode ultrapassar o 59% da potência contida no vento.

## 2.4 Análise aerodinâmica da pá

A velocidade aparente do vento,  $v$ , que age sobre uma pá de uma turbina eólica é dada pela soma de duas componentes: uma devida ao vento que entra no tubo de fluxo e paralela ao eixo da turbina,  $v_1$ , e outra devida à velocidade de rotação da pá,  $v_t$ , perpendicular à anterior (Fig. 2.4). Esta última é dada pelo produto entre a velocidade angular de rotação do rotor e a distância do eixo do rotor ( $v_t = \Omega r$ ). Portanto, o modulo da velocidade resultante é dado por:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_t^2} = \sqrt{v_1^2 + (\Omega r)^2}$$

[ 2.12 ]

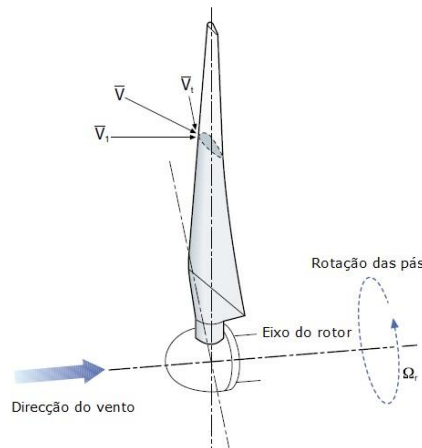


Fig. 2-4 Representação gráfica das componentes do vento agentes sobre a pá (ABB, 2011).

A acção da velocidade do vento aparente dá origem a duas forças aerodinâmicas: a força de sustentação  $F_L$  e a força de arrastamento  $F_D$ , respectivamente perpendicular e paralela à direcção do vento aparente, sendo:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L A \rho v^2$$

[ 2.13 ]

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho v^2$$

[ 2.14 ]

com:

- $C_L$  = coeficiente de sustentação;
- $C_D$  = coeficiente de arrastamento, ou de resistência aerodinâmica;
- $A$  = superfície da pá.

A *Figura 2.5* mostra o conjunto de forças que agem sobre uma genérica secção transversal da pá. O ângulo  $\delta$  é definido como ângulo de construção, e é dado pela soma do ângulo de ataque  $\alpha$ , entre o escoamento resultante e a corda máxima da secção da pá, e o ângulo de *Pitch*  $\beta$ , ou simplesmente passo, que representa o ângulo entre o plano de rotação da pá e a corda máxima da sua secção.

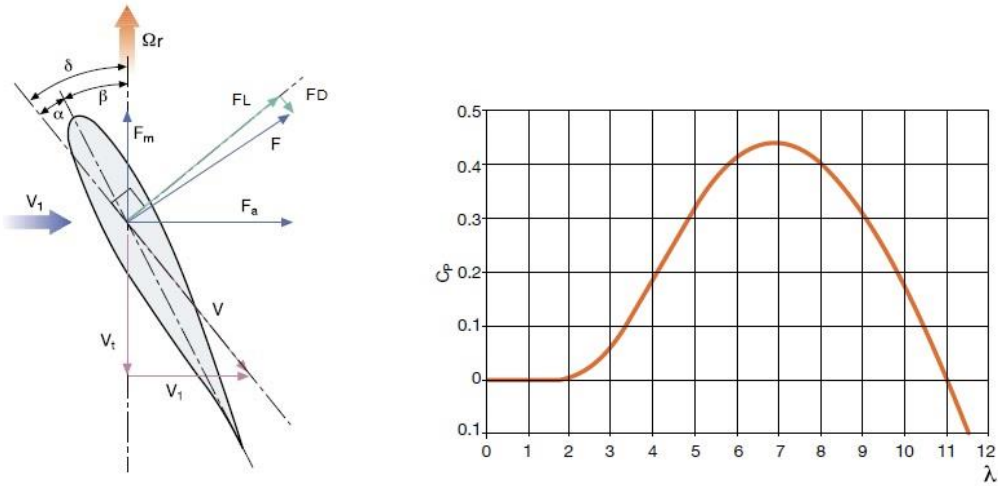


Fig. 2-5 (Esquerda) Representação gráfica das forças agentes sobre a secção transversal da pá (ABB, 2011).

Fig. 2-6 (Direita) Exemplo de curva  $\lambda$ - $C_p$  (ABB, 2011).

Decompondo a força de sustentação e a força de arrastamento respectivamente segundo a direcção perpendicular e paralela ao eixo do rotor, obtém-se a componente de força motriz ( $F_m = F_L \sin \delta - F_D \cos \delta$ ) que dá origem ao binário de rotação, e a componente de força axial ( $F_a = F_L \cos \delta + F_D \sin \delta$ ) que determina a resistência mecânica do encastramento no cubo do rotor.

Tipicamente, as características aerodinâmicas de uma pá são descritas através da relação  $\lambda - C_p$  (Fig. 2.6), onde  $\lambda$  é a razão entre velocidade tangencial na ponta da pá e a velocidade do vento ( $\lambda = \Omega R / v_1$ , sendo  $R$  o raio do rotor).

Para valores constantes do ângulo de passo é possível observar que:

- existe um único valor de  $\lambda$  para o qual a eficiência de conversão é máxima ( $C_{pmax}$ ), em função do tipo de pá;
- de forma a manter o valor máximo de  $C_p$  ao variar da velocidade do vento incidente, é necessário variar a velocidade de rotação das pás;

- para valores baixos de  $\lambda$  existe uma redução da força de sustentação e um aumento da força de arrastamento;
- para valores elevados de  $\lambda$ , quer a força de sustentação, quer a força de arrastamento reduzem-se. As pás rodam tão rapidamente que se comportam como uma parede. O vento incidente tende a ultrapassá-la e a potência extraída é nula.

## 2.5 Sistemas de regulação

Uma turbina eólica pode ser esquematizada de forma simplificada através de um modelo mecânico que compreende uma massa rotativa com elevado momento de inércia, que representa o rotor, e outra massa rotativa que representa o gerador, ambas ligadas pelo veio de transmissão. A este modelo são aplicados o binário aerodinâmico que age sobre o rotor, o binário electromagnético que age sobre o gerador e, eventualmente, o binário aplicado ao veio de transmissão pelo sistema de travagem.

As funções dos mecanismos de regulação de potência dependem do particular regime de funcionamento da turbina. De fato, para velocidades do vento inferiores à nominal, o objectivo principal é de maximizar a energia produzida, operando no ponto de máxima eficiência da pá, enquanto para velocidades superiores, é de limitar a potência produzida, mantendo-a em proximidade do valor nominal, de forma a prevenir cargas extremas.

Nas turbinas a velocidade de rotação fixa, a velocidade de rotação é determinada pela frequência da rede, da caixa de velocidades e do número de polos do gerador eléctrico. O binário do gerador varia em função do binário aerodinâmico, e o seu controlo, logo da potência à saída, é possível apenas através do mesmo binário aerodinâmico. Este último pode ser regulado alterando a geometria do rotor, isto é variando o passo, com consequente regulação das forças de sustentação e de resistência. Quando a velocidade do vento excede determinados valores, aumenta-se o ângulo de passo de forma a minimizar a carga aerodinâmica nas pás. Alternativamente é possível reduzir o passo, logo aumentar o ângulo de ataque, até que o escoamento não se separe da superfície externa das pás, dando origem ao fenómeno chamado *stall*. É neste último princípio que se baseia o mecanismo de controlo de potência para as turbinas que não permitem a regulação do passo. De fato, sem intervir na geometria do rotor, ao aumentar da velocidade de rotação das pás, aumenta também o ângulo de ataque, resultando num mecanismo automático passivo de regulação.

Tipicamente, as turbinas a velocidade fixa estão associadas a um gerador de indução (assíncrono) em gaiola de esquilo, directamente ligado à rede ou através de conversores electrónicos de potência, com um *soft-starter* para reduzir a corrente de activação, e um banco de condensadores para compensar a potência reativa. Estes aerogeradores têm a vantagem de ser simples, robustos e baratos. Por outro lado, consomem potência reativa, são sujeitos a elevados esforços mecânicos e não permitem um adequado controlo da qualidade da potência injectada na rede.

As turbinas a velocidade variável permitem adaptar continuamente a velocidade de rotação das pás à velocidade do vento, mantendo constante a velocidade na ponta da pá ao seu valor ótimo. O binário eletromagnético também é mantido constante e as flutuações de velocidade do vento são absorvidas pela variação de velocidade do rotor, resultando numa melhor qualidade de potência injectada. Para velocidades do vento moderadas, estes sistemas funcionam normalmente a passo constante, e a variação da velocidade de rotação é imposta apenas pelo binário eletromagnético. Atingida a potência nominal, a acção combinada sobre o binário do gerador e o passo é utilizada para controlar quer a potência à saída, mantida ao seu valor nominal, quer a velocidade do rotor.

Tipicamente estão associadas a geradores síncronos ou assíncronos ligados à rede através de um conversor de potência que controla a velocidade do rotor. Contrariamente aos sistemas a rotação fixa são sujeitos a esforços mecânicos reduzidos e são caracterizadas por maiores custos e maiores eficiências em termos de extracção de potência.

## 2.6 Impacte Ambiental

### 2.6.1 Ruído

Em muitos países europeus existe uma legislação específica para regulamentar a medição e avaliação do ruído gerado pelas turbinas eólicas, e estabelecer os limites gerais dos vários níveis de ruído. Em muitos casos, o limite máximo do nível de ruído permitido no meio urbano corresponde a  $40 \text{ dB}(A)^{10}$ .

O ruído emitido pelas turbinas eólicas pode ser de tipo aerodinâmico ou mecânico. O ruído mecânico é gerado principalmente pelas componentes rotativas presentes na caixa de velocidades e no gerador. O meio de transmissão pode ser de tipo aéreo ou de tipo estrutural. Normalmente tende a ser tonal, pelo que resulta mais intrusivo que um ruído de banda larga com o mesmo nível de pressão sonora.

O ruído aerodinâmico é o ruído produzido pelo vento a passar nas pás, e pode ser:

- a baixa frequência (com frequência na banda de  $20$  a  $100 \text{ Hz}$ ). Causado principalmente pelo escoamento da esteira;
- de banda larga (distribuição continua da pressão sonora com frequências superiores a  $100 \text{ Hz}$ ). Causado por interacção entre as pás da turbina e a turbulência atmosférica;
- de banda larga com componentes tonais. Gerado pela própria pá, por exemplo em presença defeitos de superfície.

---

<sup>10</sup>  $\text{dB}(A)$ , Escala de decibel com filtro A. Utilizado para atenuar o peso das altas frequências, de forma a simular as variações de sensibilidade do ouvido humano em frequências distintas.



Através de um modelo simples de propagação de ruído baseado na propagação hemisférica é possível calcular o nível de pressão sonora de uma turbina isolada  $L_p$ , ou de um conjunto de turbinas  $L_{pn}$ , da seguinte forma (Burton, Jenkins, Sharpe, & Bossanayi, 2011):

$$L_p = L_w - 10 \log_{10}(2\pi R^2) - \alpha R \quad [ 2.15 ]$$

$$L_{pn} = 10 \log_{10} \sum_{j=1}^{J=n} 10^{0,1L_{pj}} \quad [ 2.16 ]$$

Sendo:

- $L_w$  = potência sonora;
- $R$  = distância da fonte;
- $\alpha$  = coeficiente de absorção sonora em função da frequência. Tipicamente,  $\alpha = 0,005dB(A)m^{-1}$ .

Observando as expressões anteriores é possível afirmar quanto segue:

- duplicando a distância da fonte, o nível de pressão sonora de uma turbina isolada reduz-se de 6 dB;
- adicionado níveis de pressão sonora com igual valor, o nível do ruído aumenta em 3 dB;
- se o valor absoluto da diferença entre dois níveis de pressão sonora for menor que 15 dB, a contribuição do nível menor é desprezável.

Para uma correta previsão do ruído é necessário ter em conta uma série de outros fatores, como a absorção atmosférica, a reflexão superficial, a direção e a velocidade do vento. Mais em particular, no contexto urbano, há que se considerar a complexa propagação do ruído devida a reflexão nas coberturas e nas fachadas, e da componente de ruído gerada pela amplificação das vibrações estruturais. Daqui resulta a necessidade de recorrer programas informáticos de simulação (Stankovic, Campbell, & Harries, 2009).

## 2.6.2 Flicker visual e Flashing

O *flicker* visual ocorre quando a luz passa através das pás em rotação, provocando efeitos de sombra que podem incomodar os residentes em zonas próximas das turbinas eólicas. Mais em particular, a variação intermitente da luz solar com frequências entre 2,5 e 20 Hz, pode causar problemas em sujeitos afectados de epilepsia (Burton, Jenkins, Sharpe, & Bossanayi, 2011). Resulta portanto necessário realizar um estudo de zonas residenciais e rodoviárias nas horas de *flicker*, de forma a programar a paragem temporária das turbinas nas horas em que o fenómeno se manifesta e uma análise de visibilidade da turbina.

Da mesma forma, o sol a embater nas pás é por vezes reflectido, provocando um efeito de reflexão intermitente da luz chamado *flashing*. Este problema é facilmente resolúvel mediante o utilizo de tintas opacas.

### **2.6.3 Interferência electromagnética**

As turbinas eólicas podem constituir um obstáculo para as ondas electromagnéticas incidentes, causando a reflexão, dispersão ou refacção das mesmas. Podem interferir com sistemas de comunicação via radio ou televisão, bem como redes por microondas e satelitais, provocando uma distorção significativa do sinal captado pelo receptor. Muito embora este problema seja mais acentuado em grandes parques eólicos, um projecto de energia eólica urbana pode ter dimensões suficientemente grandes ou ser localizado em áreas particularmente sensíveis, a requerer uma prévia interacção com entidades ligadas a segurança nacional, companhias de telecomunicação, autoridades de aviação e serviços de tráfego aéreo nacionais. Em muitos países, por exemplo, existem limitações específicas quer de diâmetro, quer de potência instalada, das turbinas eólicas construídas nas proximidades dos aeroportos.

### **2.6.4 Segurança pública**

A segurança pública ligada ao funcionamento de turbinas eólicas, no meio urbano, representa um aspecto mais relevante, se comparado com os sistemas eólicos instalados em ambientes rurais, devido a maior densidade populacional, logo a maior probabilidade de ocorrência de acidentes em caso de colapso das mesmas. Para garantir níveis de segurança equiparáveis aos estabelecidos para as áreas rurais, é necessário projectar as turbinas eólicas urbanas garantindo uma menor probabilidade de ocorrência de colapsos. As áreas urbanas são também caracterizadas por elevados níveis de turbulência. As pás devem ser desenhadas tendo em conta da variabilidade das solicitações conexas. Muitas vezes, os fabricantes optam por montar cabos metálicos de segurança entre as pás e o eixo do rotor, ou encaixar o rotor em gaiolas metálicas (Mertens, 2006).

### **2.6.5 Biodiversidade e avifauna**

Os aspectos negativos mais relevantes, relativos aos impactes das turbinas eólicas sobre a avifauna, são resumidos nos seguintes pontos:

- possibilidade de colisão de aves e morcegos nos aerogeradores;
- perturbação de aves e morcegos na alimentação, repouso e processo reprodutivo em ambiente urbano;

- alteração dos habitats de migração em ambiente urbano;
- redução do habitat disponível em ambiente urbano.

Muito embora no passado estes aspectos fossem pouco considerados, hoje em dia, a consulta de especialistas em avifauna, a análise de riscos ecológicos, e o recurso a medidas de mitigação de riscos, constituem uma prática consolidada. A instalação de turbinas eólicas no meio urbano e longe de habitats naturais, consegue ultrapassar, ou pelo menos mitigar, parte de tais impactos negativos. De facto, a principal ameaça para a avifauna devida a presença de turbinas eólica no contexto urbano, deriva da possibilidade de colisão nos aerogeradores. Contudo, os dados estatísticos existentes sobre as mortes de aves causadas pelas turbinas eólicas, sobretudo se comparados com as mortes causadas pelas centrais eléctricas convencionais, assumem dimensões pouco alarmantes.

### 2.6.6 Impacte visual

Nem sempre é necessário reduzir ao máximo a visibilidade das turbinas no meio urbano, uma vez que a percepção comum depende fortemente do contexto onde elas se inserem. Uma correcta avaliação de impacte visual compreende:

- caracterização paisagística da área de interesse;
- estudo das zonas influenciadas visualmente, de forma a individuar eventuais pontos críticos;
- identificação dos grupos sociais afectados;
- avaliação visiva mediante realização de fotomontagens;
- avaliação da percepção dos efeitos sobre a particular tipologia de paisagem;
- avaliação do *flicker* visual.

Particular importância deve ser dada também à estética da turbina. Tipicamente, as melhores qualidades estéticas são atribuídas às soluções de eixo horizontal e com três pás.

## 3 O Recurso Eólico

---

A caracterização do recurso eólico é um campo de fundamental importância para a correcta definição de diversos aspectos ligados aos sistemas de aproveitamento de energia eólica, como: localização, projecto, operação e avaliação de desempenho. No meio urbano, devido à complexa parametrização dos elementos de rugosidade e à forte variabilidade temporal e espacial do recurso eólico, a caracterização do escoamento é extremamente difícil.

No presente capítulo, partindo de uma breve descrição da circulação global, serão apresentados os principais modelos matemáticos existentes, para a descrição das características do escoamento em proximidade da superfície terrestre. Na última secção, serão analisados os fenómenos locais originados pela interacção entre o escoamento e os elementos de rugosidade do meio-urbano.

### 3.1 A circulação atmosférica

O movimento de uma massa elementar de ar é determinado pela segunda lei de Newton  $F = ma$ , onde  $m$  representa a massa,  $a$  a aceleração, e  $F$  é a resultante de todas as forças que sobre ela agem.

A circulação atmosférica resulta principalmente do aquecimento diferencial da terra, respondendo ao gradiente de pressão que assim se estabelece. Considerando a acção da força gravitacional, é possível desprezar a componente vertical da força do gradiente de pressão, pelo que a circulação atmosférica se dá principalmente no plano horizontal. Uma boa aproximação ao vento observado longe da superfície terrestre obtém-se a partir do balanço entre a força do gradiente de pressão<sup>11</sup> e a força de Coriolis<sup>12</sup> (Manwell, McGowan, & Rogers, 2002). É assim definido o Vento Geostrófico, dirigido paralelamente às isobáricas:

$$U_{geo} = -\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial n}$$

[ 3.1 ]

Sendo:

- $U_{geo}$  = velocidade do Vento Geostrófico;
- $\frac{\partial p}{\partial n}$  = gradiente de pressão normal às isobáricas;
- $f = 2\omega \sin(\varphi)$ , Parâmetro de Coriolis;
- $\omega$  = Velocidade angular da rotação terrestre;
- $\varphi$  = Latitude.

---

<sup>11</sup> $F_p = -1/\rho \partial p/\partial n$ .

<sup>12</sup> $F_c = fU$ . Força fictícia causada por medições em relação a uma estrutura de referência rotativa.

Na realidade, os ventos atmosféricos são influenciados também da inércia do ar, da rotação da terra e do atrito exercitado pela superfície terrestre.

A presença de zonas de alta e baixa pressão implica a curvatura das isobáricas, pelo que deverá existir necessariamente aceleração. É nestas zonas que a expressão que descreve o vento geostrófico deve ser modificada, introduzindo no balanço a força centrífuga dirigida para o exterior da curva. Obtém-se uma relação com validade mais geral, que descreve o Vento do Gradiente, direccionado tangencialmente às isobáricas (Simiu & Scanlan, 1996):

$$U_{gr}f \pm \frac{U_{gr}^2}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad [3.2]$$

Onde:

- $U_{gr}$  = velocidade do Vento de Gradiente;
- $R$  = raio de curvatura da trajectória das partículas de ar.

Se se considera uma massa de ar localizada no hemisfério Norte, então a [3.4] referir-se-á a uma circulação ciclónica (em torno de um centro de baixa pressão), e a [3.3] a uma circulação anticiclónica (em torno de um centro de alta pressão). Para raios de curvaturas finitos, obtém-se as seguintes soluções, relativas às duas situações:

$$U_{gr} = -\frac{Rf}{2} + \sqrt{\frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \left(\frac{Rf}{2}\right)^2} \quad [3.3]$$

$$U_{gr} = +\frac{Rf}{2} - \sqrt{\left(\frac{Rf}{2}\right)^2 - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} \quad [3.4]$$

Para o escoamento em torno de um centro de baixa pressão perto da superfície, o vento atravessará as isobáricas, convergindo lentamente para o centro e divergindo em altitude. Em correspondência de um centro de alta pressão, ocorrerá o mecanismo inverso, com descida de ar e divergência do centro (*Fig. 3.1*).

As expressões anteriores partem do pressuposto que os efeitos do atrito sejam negligenciáveis, situação que não se verifica na camada mais baixa da atmosfera, onde a velocidade do vento é tipicamente inferior ao que ocorre nas altitudes superiores. Designa-se esta região Camada Limite Atmosférica (CLA), que se pode entender como a parte da troposfera directamente influenciada pela presença da superfície. É esta a região de interesse para as aplicações da engenharia do vento.

Na CLA, a direcção do vento não é dirigida paralelamente às isobáricas. Considerando duas partículas de ar posicionadas a cotas diferentes da CLA e sujeitas a um movimento horizontal de tipo geostrófico, a partícula situada a uma cota mais elevada será caracterizada por valores de velocidade e da força de Coriolis maiores, implicando que o ângulo de desvio entre a

direcção do vento e a direcção das isóbaras diminua ao aumentar da cota. Portanto, no hemisfério Norte, a velocidade desenvolver-se-á em forma de espiral com a altitude (Simiu & Scanlan, 1996).



Fig. 3-1 Vento de gradiente em regime anticiclónico e ciclónico (ABB, 2011).

### 3.1.1 As escalas de movimento

A circulação atmosférica engloba a sobreposição de escoamentos interdependentes, cujas escalas (espacial e temporal), abrangem uma gama muito ampla. As escalas de comprimento podem variar de milímetros, como no caso da influência da rugosidade local, até quilómetros, como nos movimentos atmosféricos associados a centros de baixa pressão e anticiclones. A escala temporal, por sua vez, é determinada pelo tempo de vida ou período de duração do fenómeno. Os movimentos atmosféricos regionais são classificados como movimentos de macroescala, também chamada escala sinóptica. A mesoescala inclui os movimentos com dimensões intermedias. Os fenómenos de menor dimensão e duração, que podem ser estudados através de campanhas experimentais de medição, são classificados como fenómenos de escala local ou de microescala (dimensões inferiores a escala local e duração típica inferior a uma hora).

### 3.1.2 A análise espectral

Dispondo de uma serie de dados meteorológicos, como a velocidade horizontal do vento, por exemplo, é possível decompô-los em duas componentes: uma de tipo determinístico baseada numa média espacial ou temporal de valores, e outra flutuante, que pode ser tratada de forma estatística:

$$u = \bar{u} + u'$$

[ 3.5 ]

Onde:

- $u$ , Velocidade instantânea do vento;
- $\bar{u}$ , Velocidade média horizontal do vento;
- $u'$ , Desvio instantâneo do valor médio da velocidade horizontal do vento.

Ambas as componentes dependem fortemente da escala de movimento de interesse. Se consideramos fenómenos de escala sinótica, por exemplo, onde a componente estática é calculada em intervalos de tempos tipicamente de uma hora, a componente flutuante incluirá os movimentos de microescala. Na microescala em vez, os desvios instantâneos dos valores médios de velocidade referir-se-ão a fenómenos turbulentos. (Spera, 1994).

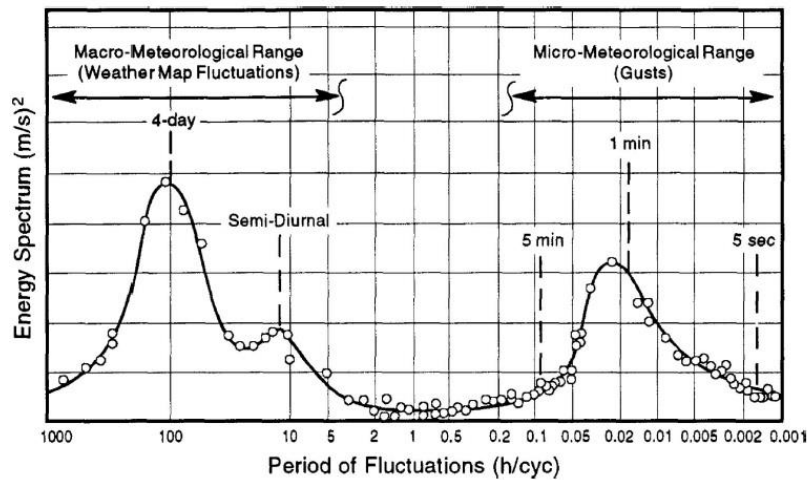


Fig. 3-2 Espectro de energia do vento elaborado por Van Der Hoven (Spera, 1994).

As flutuações do vento podem ser vistas como o resultado de ventos que variam sinusoidalmente, sobrepostos aos ventos médios constantes, caracterizados por uma gama de frequências e amplitudes. Daqui resulta a possibilidade de descrever o vento através duma função de densidade de energia, ou seja uma função que descreve a relação entre frequência e amplitudes de ondas sinusoidais. O espectro elaborado por Van Der Hoven (Fig. 3.2) mostra que, a maioria das variações de velocidade ao longo do tempo são contidas dentro da microescala e da macroescala. A zona compreendida aproximadamente entre cinco minutos e cinco horas representa uma zona de baixo conteúdo energético (vazio espectral), considerando-se aceitáveis os valores médios calculados em intervalos incluídos nesta zona. É preferível que tais intervalos não sejam muito pequenos, para minimizar o carácter não estacionário do vento, nem demasiado grandes, de forma a poder incorporar as flutuações caracterizadas por altas frequências. A velocidade média do vento calcula-se como segue, normalmente utilizando um intervalo de tempo  $\Delta t$  de uma hora ou dez minutos (Spera, 1994):

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u dt$$

[ 3.6 ]

## 3.2 A Camada Limite Atmosférica

A Camada Limite Atmosférica representa a parte da troposfera que é directamente influenciada pela presença da superfície da Terra e que responde aos condicionalismos impostos pela superfície com uma escala de tempo de cerca de uma hora ou menos. A sua descrição e modelação são muito complexas, devido à interacção de vários factores, como a rotação terrestre, o aquecimento diferencial, a variabilidade das condições climáticas e a coexistência de escoamento turbulento de tipo convectivo e com origem nas tensões de corte. A definição de CLA sofreu alterações significativas ao longo dos anos. Stutton, em 1953, separava a CLA em duas regiões principais (Kaimal & Finnigal, 1994):

- Uma camada superficial que se estende até 50~100m, onde as tensões de corte<sup>13</sup> são aproximadamente constantes e o escoamento não é influenciado pela rotação terrestre, mas exclusivamente pelo efeito de atrito e o gradiente vertical da temperatura.
- Uma camada que se estende a partir da camada superficial e até 500~1000m, onde as tensões de corte evoluem até se anularem no topo da CLA e o escoamento é influenciado também pela rotação terrestre.

### 3.2.1 Os Modelos Matemáticos

Na descrição e modelação dos parâmetros que definem a estrutura da CLA, a superfície terrestre é assimilada a uma superfície plana, de forma a poder assumir as condições de homogeneidade horizontal e de regime estacionário<sup>14</sup>. Devido aos efeitos de atrito, e para satisfazer a condição de não escorregamento, a velocidade média do vento é igual a zero na camada adjacente à superfície e aumenta com a altitude (*Fig. 3.3*). Esta variação é descrita através do perfil vertical da velocidade média do vento, que fornece indicações sobre a potência extraível do escoamento. Daqui resulta a importância de dispor de modelos que permitam traçar os perfis verticais a partir de dados obtidos com medições anemométricas, por exemplo. Os modelos matemáticos mais utilizados, para superfícies homogéneas e planas, são:

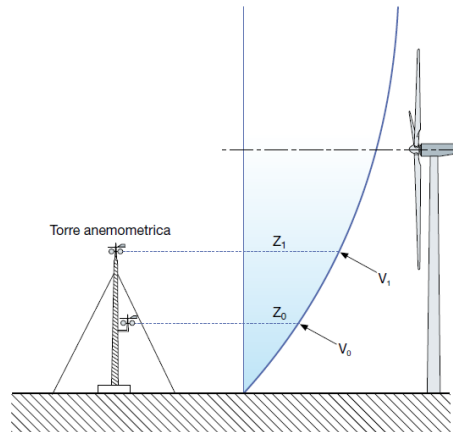
- a Lei Logarítmica (também designada por Lei de Parede);
- a Lei de Potência.

---

<sup>13</sup> Forças exercitadas pelo vento sobre a superfície terrestre, devido ao atrito.

<sup>14</sup> As propriedades estatísticas do vento resultam independentes do tempo.





**Fig. 3-3 Perfil vertical da velocidade média do vento típico (ABB, 2011).**

Enquanto a primeira é o produto de investigações empíricas e teóricas, a segunda é baseada em resultados experimentais, obtidos considerando escoamentos em função de números de Reynolds elevados no interior de condutas cilíndricas.

Uma vez definida a velocidade de atrito  $u_*$ , que representa os efeitos das tensões de corte  $\tau_0$  exercidas pelo vento sobre a superfície terrestre, a Lei Logarítmica, válida para condições atmosféricas neutras<sup>15</sup> e ventos fortes, escreve-se como:

$$\bar{U}_z = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right)$$

[ 3.7 ]

Sendo:

- $\bar{U}_z$  = velocidade média do vento;
- $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ ;
- $k$  = constante de Von Karman. Valor igual a 0,4;
- $z$  = cota;
- $z_0$  = escala de comprimento de rugosidade.

A partir de investigações meteorológicas, foi possível estabelecer uma fórmula para o cálculo da cota até onde resulta aplicável a Lei Logarítmica, que corresponde aproximadamente a 10% da espessura da CLA (100 – 150m):

$$z_l = b' \frac{u_*}{f}$$

[ 3.8 ]

<sup>15</sup> A atmosfera considera-se neutra, quando o gradiente de temperatura e o gradiente adiabático seco correspondem. Assim, uma massa de ar sujeita a uma força de deslocamento, mantém a própria posição, tendo uma temperatura igual a do ambiente confinante. Esta situação ocorre em presença de dias nublados ou ventosos, dado que as nuvens minimizam o desenvolvimento de qualquer estratificação de temperatura, e o vento contribui para uma distribuição homogênea da temperatura através dos movimentos convectivos.

Sendo:

- $b'$  = parâmetro com valores entre 0,015 – 0,03.

Importa salientar que a escala de comprimento de rugosidade,  $z_0$ , representa a cota teórica onde a velocidade é igual a zero. Este caracteriza a influência das irregularidades superficiais sobre o perfil vertical da velocidade: quanto maior é a rugosidade, maior será a espessura da camada superficial onde se manifestam os seus efeitos, resultando num incremento vertical da velocidade mais atenuado (Fig. 3.4). Não sendo uma grandeza física, pode ser considerado como uma escala de comprimento para a tensão de atrito, ou seja uma medida do arrastamento. Embora a literatura existente apresente várias fórmulas para o calculo de  $z_0$ , ainda hoje objeto de discussão, muitos autores reportam valores típicos associados a diferentes tipos de superfície. Um exemplo é reportado na tabela seguinte (Manwell, McGowan, & Rogers, 2002).

Tipo de Superfície	$z_0$ (mm)
Muito lisa, gelo ou lama	0,01
Mar aberto e calmo	0,02
Mar agitado	0,50
Campo de neve	3,00
Campo de erva	8,00
Pasto rugoso	10,00
Campo de pousio	30,00
Culturas	50,00
Poucas árvores	100,00
Muitas árvores, poucos edifícios	250,00
Floresta e bosque	500,00
Subúrbios	1500,00
Centro de cidade com edifícios altos	3000,00

Tab. 3-1 Valores típicos do comprimento de rugosidade, para vários tipos de superfície (Manwell, McGowan, & Rogers, 2002).

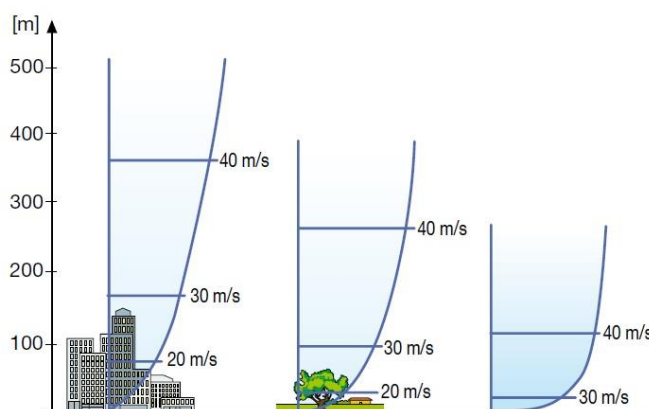


Fig. 3-4 Efeito da rugosidade sobre o perfil vertical da velocidade média do vento (ABB, 2011)

Os mapas de vento reportados em atlas do vento fornecem valores de referência da velocidade média, medidos em condições padrão, isto é  $z_{ref} = 10m$  e  $z_{0,ref} = 0,03m$ . Nestas

situações, torna-se útil a aplicação da Lei de Potência, que permite calcular a velocidade média do vento a uma determinada cota, em função de um valor relativo a uma cota de referência:

$$\bar{U}_z = \bar{U}_{ref} \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad [3.9]$$

O expoente  $\alpha$  é um parâmetro fortemente variável em função de vários fatores, como a cota, as horas do dia, a estação, a natureza do terreno, a velocidade do vento, a temperatura, e um ulterior conjunto de parâmetros térmicos e mecânicos. Contudo, existem modelos que permitem o seu cálculo. Um dos mais utilizados é o modelo Spera-Richards (Spera, 1994):

$$\alpha = \left( \frac{z_0}{z_{ref}} \right)^2 [1 - 0,55 \log(U_{ref})] \quad [3.10]$$

Os valores apresentados nos perfis verticais da velocidade referem-se a médias espaciais e temporais. A previsão da velocidade do vento não compete aos modelos supracitados, uma vez que fornecem valores médios correspondente a uma área de alguns metros quadrados.

### 3.3 A Camada Limite Urbana

Nas zonas urbanas o escoamento é substancialmente diferente que nas áreas rurais. Devido à complexa geometria superficial e à elevada rugosidade, na região mais superficial o escoamento não é uniforme e é caracterizado por valores reduzidos de velocidade média elevados níveis de turbulência. Na Camada Limite Urbana (CLU), para descrever o perfil vertical da velocidade média do vento, é possível manter a validade da Lei Logarítmica só a partir de uma determinada cota, definida como a soma entre o comprimento de rugosidade e o deslocamento do plano de referência  $d$  (Fig. 3.5). Este último parâmetro constitui uma medida do bloqueamento imposto ao escoamento e, como no caso do comprimento de rugosidade, depende das características e da configuração dos elementos de rugosidade. A Lei Logarítmica para a CLU escreve-se como:

$$\bar{U}_z = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z - d}{z_0} \right) \quad [3.11]$$

A literatura da engenharia do vento cita diferentes modelos para estimar  $d$  e  $z_0$  no meio urbano, tipicamente em função da altura média dos edifícios  $\bar{H}$ , e a partir duma velocidade média de referência.

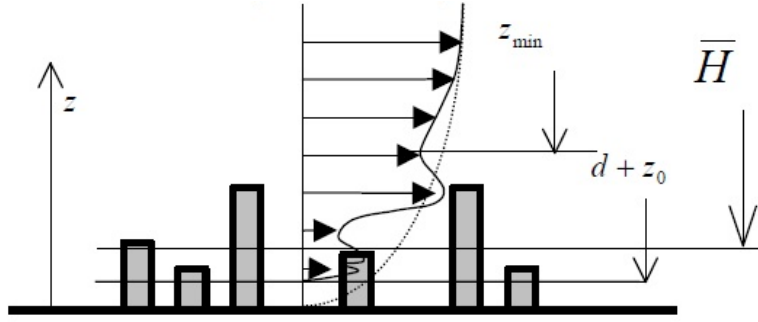


Fig. 3-5 Perfil vertical da velocidade média na CLU (Mertens, 2006).

Na base dos estudos de Theurer, que relacionam o comprimento de rugosidade com a densidade frontal  $\lambda_f$ <sup>16</sup> e o deslocamento do plano de referência com a densidade plana  $\lambda_p$ <sup>17</sup>, Macdonald desenvolveu um modelo analítico para o cálculo de ambos os parâmetros (Macdonald, Griffiths, & Hall, 1998):

$$\frac{d}{\bar{H}} = 1 + A^{-\lambda_p}(\lambda_p - 1) \quad [3.12]$$

$$\frac{z_0}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{d}{\bar{H}}\right) \exp \left[ - \left(0,5\beta \frac{C_d}{k^2} \left(1 - \frac{d}{\bar{H}}\right) \lambda_f \right)^{-0,5} \right] \quad [3.13]$$

Com:

- $A$  = coeficiente correctivo, de controlo para a curvatura do gráfico  $d/\bar{H}$  (Fig. 3.6);
- $\beta$  = coeficiente correctivo, de controlo para o coeficiente de resistência aerodinâmica;
- $C_d = D/\frac{1}{2}\rho AU^2$ . Coeficiente de resistência aerodinâmica do obstáculo;
- $D$  = força de arrastamento.

Tendo sido desenvolvido sobre um modelo constituído por elementos de rugosidade cúbicos ( $\lambda_f = \lambda_p = \lambda_{eq}$ ), os valores de  $z_0$  obtidos resultam muitas vezes subestimados. Contudo, não deixa de ser útil para analisar o escoamento de um ponto de vista qualitativo. De fato permite classificar o escoamento segundo três regimes típicos (Fig. 3.7):

- isolado (para  $\lambda_p \approx 0,1$ );
- interferente (para  $0,1 < \lambda_p < 0,4$ );
- rasante (para  $\lambda_p > 0,4$ ).

<sup>16</sup> Razão entre a área frontal dos obstáculos  $A_f$  e a área total da região ocupada pelos obstáculos  $A_d$ .

<sup>17</sup> Razão entre a área de implantação dos obstáculos  $A_p$  e a área total da região ocupada pelos obstáculos  $A_d$ .

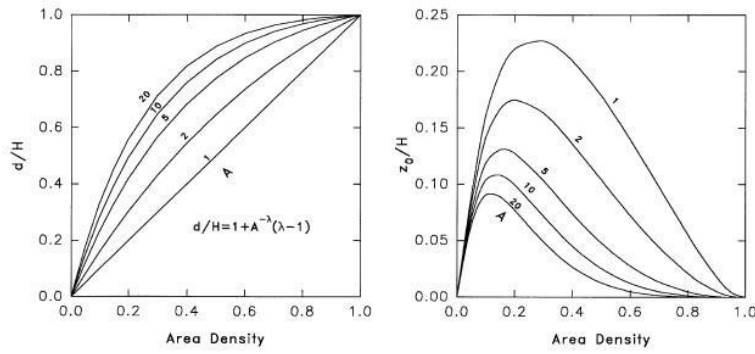


Fig. 3-6 Modelo teórico da variação de  $d/H$  e  $z_0/H$  com a densidade superficial (Macdonald, Griffiths, & Hall, 1998)

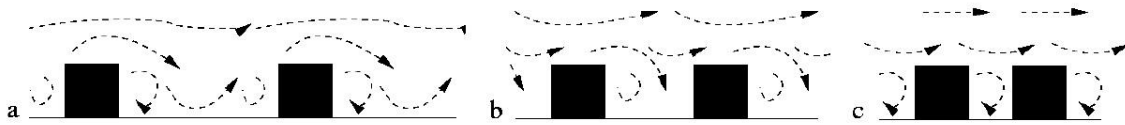


Fig. 3-7 Regimes típicos do escoamento na CLU em função da densidade dos elementos de rugosidade: (a) isolado, (b) interferente, (c) rasante (Best, et al., 2008).

O modelo analítico elaborado por Raupach, inicialmente aplicado as superfícies vegetais e sucessivamente adaptado ao meio urbano, permite obter resultados mais precisos (Grimmond & Oke, 1998):

$$\frac{d}{H} = 1 - \frac{1 - \exp(-\sqrt{15\lambda_f})}{\sqrt{15\lambda_f}} ; \quad [3.14]$$

$$\frac{z_0}{H} = \left(1 - \frac{d}{H}\right) \exp\left(-\frac{k}{\min(\sqrt{0,003 + 0,3\lambda_f}, 0,3)} + 0,193\right) \quad [3.15]$$

Dada a complexidade do fenómeno, e considerando que nem sempre é possível realizar uma análise morfométrica do local, uma alternativa valida para realizar uma análise preliminar consiste no recurso a valores típicos, como os reportados na *Tabela 3.2* (Grimmond & Oke, 1998).

TIPOLOGIA DE SUPERFÍCIE URBANA	$\bar{H}(m)$	$z_0(m)$	$d(m)$
<b>Altura e densidade baixas</b> Residencial – Moradias com um ou dois andares, jardins, árvores baixas. Moradias e pequenos serviços. Armazéns, pequenas indústrias, poucas árvores.	5.0-8.0	0.3-0.8	2.0-4.0
<b>Altura e densidade médias</b> Residencial – Moradias em banda, geminadas até 3 andares, grandes árvores. Blocos de edifícios até 5 andares com espaços abertos. Misto – Moradias com serviços, pequenas indústrias, igrejas, escolas.	7.0-14.00	0.7-1.5	3.5-8.0
<b>Altura e densidade elevadas</b> Residencial – Blocos de edifícios com densidade elevada e até 6 andares, grandes serviços (fábricas, universidades, etc.), centro da cidade.	11.0-20.0	0.8-1.5	7.0-15.0
<b>Arranha-céus e densidade muito elevada</b> Centros urbanos ou suburbanos com torres em blocos e densidade muito elevada.	>20.0	>2.0	>12

**Tab. 3-2 Valores típicos do comprimento de rugosidade, para vários tipos de superfície (Manwell, McGowan, & Rogers, 2002).**

Quando o escoamento encontra uma mudança de rugosidade, os efeitos provocados pela nova superfície demoram algum tempo a desenvolver-se e são mais evidentes a uma certa distância da fronteira, sendo mais ou menos acentuados em função da diferença entre os dois valores de rugosidade. Com a passagem do escoamento de uma área rural a uma urbana, este fenómeno resulta na formação da CLU, cuja espessura aumenta com a distância da fronteira que separa as duas regiões.

Dentro da CLU é possível identificar diferentes subcamadas (*Fig. 3.8*). A primeira, mais superficial, é a Camada de Cobertura Urbana (CCU), com uma espessura tipicamente igual à altura média dos elementos de rugosidade, onde o escoamento é governado e gerado pelo escoamento adjacente, sendo o campo de velocidade condicionado pelos elementos de rugosidade, cuja parametrização é extremamente complexa.

Por cima da CCU, encontra-se uma subcamada de rugosidade caracterizada por fenómenos turbulentos fortemente variáveis em função da interação com os elementos de rugosidade. Além desta subcamada é possível aplicar a Lei Logarítmica, uma vez que se encontram as características típicas de qualquer outra camada superficial, isto é, os fluxos de massa, quantidade de moto e calor são aproximadamente constantes. Tal região é chamada subcamada de inércia, ou Camada Limite Interna.

A aplicação da Lei Logarítmica na subcamada de inércia requer o conhecimento da velocidade de atrito  $u_*$ . Quando este dado não se encontra disponível, é possível utilizar uma velocidade de referência, que, em ausência de medições anemométricas, pode ser obtida recorrendo a altas de vento. A conversão na velocidade interna à subcamada de inércia é obtida aplicando a

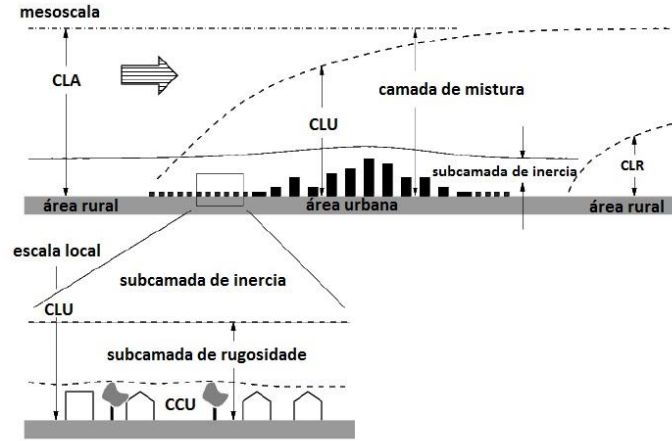


Fig. 3-8 Estrutura da CLU (Best, et al., 2008)

abordagem teórica típica de uma mudança de rugosidade, entre a área urbana e a área rural (Mertens, 2006).

A Lei Logarítmica na área rural, em termos de velocidade de atrito, escreve-se como:

$$u_{*r} = \frac{\bar{U}_{zr} k}{\ln\left(\frac{z_r}{z_{0r}}\right)}$$

[ 3.16 ]

Sendo  $\delta$  a espessura da CLU e  $\bar{U}_\delta$  a velocidade média no topo da subcamada de inércia, pode-se escrever, de forma análoga, a velocidade de atrito para a subcamada de inércia como:

$$u_{*u} = \frac{\bar{U}_\delta k}{\ln\left(\frac{\delta - d}{z_{0u}}\right)}$$

[ 3.17 ]

Assumindo que, além da CLU, a velocidade do vento segue o perfil vertical determinado pela rugosidade da área rural  $z_{0r}$ , a velocidade média no topo da subcamada em termos das propriedades da área rural:

$$\bar{U}_\delta = \frac{u_{*r}}{k} \ln\left(\frac{\delta}{z_{0r}}\right)$$

[ 3.18 ]

Substituindo as três expressões acima referidas na Lei Logarítmica para a subcamada de inércia,

$$\bar{U}_{zu} = \frac{u_{*u}}{k} \ln\left(\frac{z - d}{z_0}\right)$$

[ 3.19 ]

e manipulando, obtém-se:

$$\bar{U}_{zu} = \frac{\ln \frac{(z_u - d)}{z_{0u}} \ln \frac{\delta}{z_{0r}}}{\ln \frac{(\delta - d)}{z_{0u}} \ln \frac{z_r}{z_{0r}}} \bar{U}_{zr}$$

[ 3.20 ]

Onde, para uma distância  $x$  da fronteira que separa a área rural da área urbana, a espessura da CLU pode ser calculada como:

$$\delta = 0,75z_{0u} \left( \frac{x}{z_{0u}} \right)^{0,8}$$

[ 3.21 ]

A uma dada distância  $x$  da fronteira entre a superfície rural e a superfície urbana, a aplicação das fórmulas [3.20] e [3.21] permite calcular a espessura da CLU  $\delta$  e a velocidade média do vento na subcamada de inércia  $\bar{U}_{zu}$ , e além da CCU, a partir de uma velocidade média de referencia na área rural  $\bar{U}_{zr}$  (Fig. 3.9).

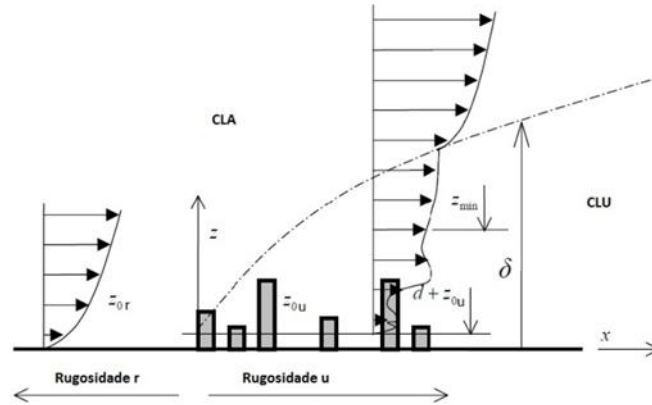


Fig. 3-9 Perfis verticais da velocidade média do vento em correspondência de uma mudança de rugosidade (área rural e área urbana) (Mertens, 2006)

### 3.3.1 A Subcamada de Rugosidade

Devido à complexa parametrização dos elementos de rugosidade e à forte variabilidade temporal e espacial dos fenômenos contidos na subcamada de rugosidade, a descrição das características do escoamento nesta região é extremamente difícil. Modificando um modelo numérico existente para camadas limites vegetais e aplicando-o a uma superfície composta de obstáculos cúbicos, representativa de uma superfície urbana simples, Macdonald (Macdonald, 2000) demonstrou a variação exponencial do perfil vertical de velocidade até a camada de inércia (Fig. 3.10). Em primeiro lugar, definiu o coeficiente de atenuação  $\alpha$ , ligado à escala de comprimento da turbulência  $l_c$ . Assumindo uma interpolação linear entre esta escala de comprimento e a escala de comprimento da subcamada de inércia, obteve um modelo que



descreve o perfil vertical da velocidade de forma exponencial, desde a superfície até ao limite da camada de rugosidade (Macdonald, 2000).

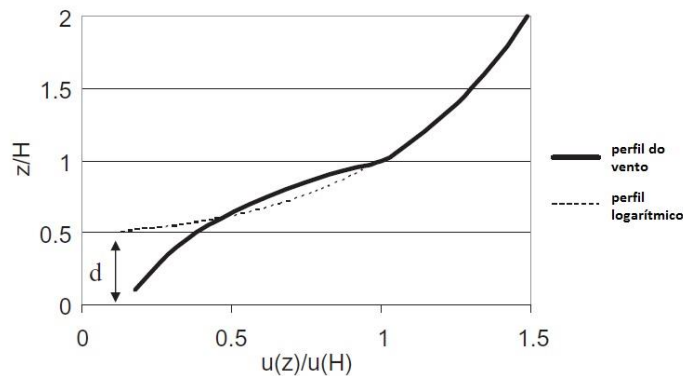
$$u(z) = u_h \exp \left( a \left( \frac{z}{\bar{H}} \right) - 1 \right) \quad [ 3.22 ]$$

$$a^3 = \frac{\bar{H}^3 \sigma_f}{2 l_c^2} \quad [ 3.23 ]$$

Com:

- $u_h$  = velocidade média do vento, medida à cota média dos elementos de rugosidade;
- $a$  = coeficiente de atenuação, que no modelo composto por elementos cúbicos, pode ser aproximado a  $a = 9,6 \lambda_f$ ;
- $l_c = 0,18(\bar{H} - d)$ . Escala de comprimento da turbulência;
- $\sigma_{f=0,5} = \frac{C'_d(z) \lambda_f}{\bar{H}}$ . Coeficiente de atrito;
- $C'_d(z)$  = Coeficiente de resistência aerodinâmica do obstáculo.

Contrariamente ao que acontece para as superfícies vegetais, no meio urbano o coeficiente de atenuação assume valores inferiores à unidade, pelo que a condição de não escorregamento não se verifica, quando o modelo é aplicado as regiões mais próximas da superfície. Dado que os valores de velocidade nestas regiões não são de interesse para o caso de estudo, o modelo não deixa de ser aplicável.



**Fig. 3-10 Perfil vertical normalizado da velocidade do vento no meio urbano (Heat & Walshe, 2007)**

Um modelo mais simples foi elaborado por Bentham & Britter, que define uma velocidade característica da camada de cobertura urbana  $\bar{U}_c$ , ou seja uma escala de velocidade obtida desprezando a variação do perfil vertical com a cota (Bentham & Britter, 2003). Assumindo que a componente do atrito global devida à superfície é desprezável se comparada com a componente devida à presença dos obstáculos, a força que age sobre um volume de controlo genérico de fluido dentro da CCU é dada por:

$$\tau_w A_d = 0,5 \rho \bar{U}_c^2 \sum_{obstáculos} (C_d A_f) \quad [3.24]$$

Esta fórmula simplifica-se inserindo um valor médio do coeficiente de arrastamento, que para os edifícios pode ser aproximado a 1, e substituindo as expressões para o cálculo da velocidade de atrito  $u_*$  e  $\lambda_f$ . Obtém-se assim uma relação simples entre a velocidade característica e um descritor de topografia urbana:

$$\bar{U}_c = u_* \sqrt{\frac{2}{\lambda_f}} \quad [3.25]$$

De forma a obter uma expressão que contenha uma informação mais detalhada sobre os elementos de rugosidade, Bentham & Britter modificam a expressão anterior, utilizando a fórmula para o cálculo do comprimento de rugosidade de Lettau,  $z_0 = 0,5 \lambda_f \bar{H}$ , onde a constante 0,5 pode ser vista como uma medida do coeficiente de arrastamento, logo substituível com 1 para o caso presente:

$$\bar{U}_c = u_* \sqrt{\frac{2\bar{H}}{z_0}} \quad [3.26]$$

Devido aos diferentes graus de informação sobre os elementos de rugosidade contidos nas duas expressões, verificou-se que a [3.26] se adapta melhor para densidades frontais  $\lambda_f < 0,2$ , enquanto a [3.25] para  $\lambda_f > 0,2$ .

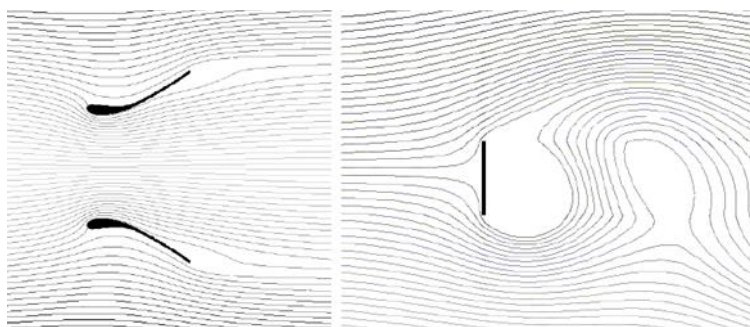
### 3.4 O escoamento em torno de edifícios

A parametrização dos elementos urbanos é extremamente complexa, pelo que resulta difícil definir relações de carácter geral, para descrever o comportamento do escoamento à volta dos edifícios. Uma possível solução a este problema consiste na aplicação de regras derivadas a partir do estudo de configurações elementares, oportunamente adaptadas aos casos considerados. De seguida serão apresentados os resultados obtidos com estudos realizados sobre edifícios isolados e sobre os desfiladeiros urbanos.

### 3.4.1 Edifícios isolados

Antes de analisar o escoamento em torno de edifícios isolados, importa fazer uma distinção entre corpos fuselados e rombos.

O que distingue um corpo fuselado de um corpo rombo é essencialmente a presença de uma camada limite muito delgada à volta de toda a sua superfície e uma esteira muito pequena. Pelo contrário, num corpo rombo, a camada limite separa-se rapidamente da superfície, dando origem a uma esteira de grande dimensão (*Fig. 3.11*).

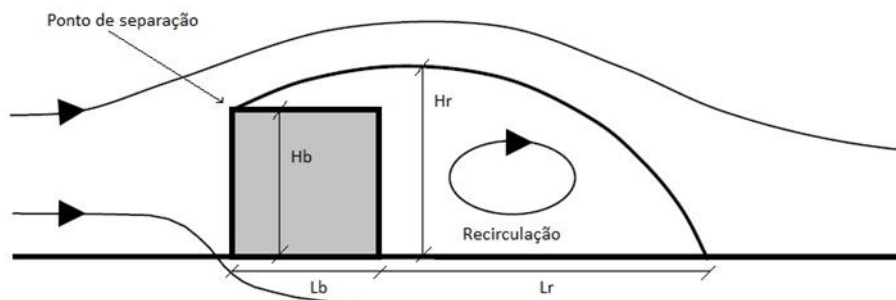


**Fig. 3-11** Linhas de corrente obtidas em CFD para um corpo fuselado (esquerda) e um corpo rombo (direita).

De forma análoga, um edifício rombo é, por exemplo, um edifício com bordos afiados, correspondendo a pontos de separação bem marcados do escoamento, dando origem a formação de bolhas de separação nas superfícies laterais e superior, e a uma esteira de grande dimensão. A força de arrastamento resultante pode ser decomposta na pressão de arrastamento, devida ao gradiente de velocidade que se estabelece à volta do edifício, e uma componente de tipo viscoso, que implica a satisfação da condição de não escorregamento. Num edifício não aerodinâmico, devido a separação da camada limite, a pressão de arrastamento é elevada e tem um papel predominante respeito à componente viscosa (Mertens, 2006).

O fenómeno principal que se manifesta em presença de edifícios rombo é a formação de uma zona recirculação, caracterizada por velocidades baixas e uma elevada intensidade de turbulência (*Fig.3.12*). Para edifícios com comprimentos elevados e paralelos à direcção do escoamento, pode-se observar o recolamento da camada limite, que volta a separar-se na borda traseira. Devido à separação da camada limite, o vector velocidade externamente à zona de recirculação, não é paralelo à cobertura, mas inclinado de um angulo variável em função da sua posição relativamente à superfície superior do edifício, das suas dimensões, da forma dos bordos e do angulo de incidência do vento (Mertens, 2006) Além da zona de recirculação, forma-se uma esteira, onde a velocidade e a intensidade de turbulência voltam gradualmente aos valores do escoamento livre. A montante do edifício, dá-se origem a uma zona de recirculação mais pequena, devido à interacção entre as elevadas pressões que se

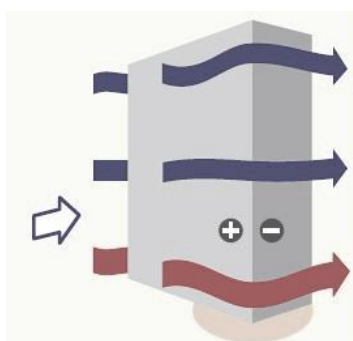
estabelecem na superfície frontal do edifício e o gradiente adverso de pressão existente em proximidade do terreno.



**Fig. 3-12** Zona de recirculação a jusante de um elemento cúbico exposto ao escoamento (Best, et al., 2008)

Outro fenómeno de particular relevância é o efeito de aceleração nos bordos do edifício expostos à acção do vento, resultantes da diferença de pressão presente nas superfícies adjacentes (Fig. 3.13). Num estudo de avaliação do conforto pedestre, realizado mediante simulações em CFD, Reiter demonstra que o factor de aceleração resulta fortemente influenciado pela altura do edifício e pelo ângulo de incidência do vento, sendo a inclinação de  $45^\circ$  respeito à normal à superfície, a que dá origem a uma maior aceleração. Os efeitos do comprimento do edifício sobre o incremento de velocidade são tão baixos a ser negligenciáveis (Reiter, 2010).

Na *Tabela 3.3*, reportam-se os principais modelos presentes na literatura para o cálculo do comprimento, da altura e largura da zona de recirculação que se desenvolve a jusante de um edifício isolado exposto ao escoamento (respectivamente,  $L_r$ ,  $H_r$ ,  $W_r$ ).



**Fig. 3-13** Efeito de aceleração nas bordas da fachada exposta ao escoamento

Relativamente à zona de recirculação que se desenvolve por cima das coberturas planas dos edifícios, Wilson elaborou um modelo baseado na definição duma dimensão característica  $R$  calculável como (Wilson, 1979):

$$R^3 = W_b H_b \min(W_b; H_b) \quad [3.27]$$

Demostrou-se que a altura da zona de recirculação  $H_r$  é máxima quando o escoamento incide perpendicularmente ao plano onde a superfície frontal do edifício é contida, a uma distância do ponto de separação igual a  $R/2$ . Esta é calculada como:

$$H_r = 0,22R \quad [3.28]$$

O estudo de Wilson fornece também uma fórmula para o cálculo da altura da esteira que se forma a partir do ponto onde  $H_r$  é máxima, sendo  $x$  a distância do bordo de separação:

$$H_w = 0,22R(2x/R)^{1/3} \quad [3.29]$$

O recolamento da camada limite ao edifício ocorre a uma distância do ponto de separação dada pela fórmula:

$$L_l = 0,9R \quad [3.30]$$

Outro aspecto a ter em consideração é a presença de um ponto de estagnação, ou seja um ponto da fachada exposta ao escoamento onde a velocidade é nula e a pressão é máxima (Fig.3.13). Da comparação dos resultados apresentados em vários estudos, resulta que na maioria dos casos, a razão entre a altura do ponto de estagnação sem deslocamento do plano de referência  $H_{s,0}$  e a altura do edifício é igual a cerca 0,85, independentemente da dimensão do edifício e do valor do comprimento de rugosidade. (Mertens, 2006).

Referência	$L_r$	$H_r$	$W_r$
(Meroney, 1982)	$2,5 \div 3H_b$	$1,5H_b$	-
(Hosker, 1984)	$\frac{AW_b}{1 + B \frac{W_b}{H_b}}$ <p>Para <math>L_b &lt; 2H_b</math>:  <math>A = 3,7(H_b/L_b)^{1/3} - 2</math>  <math>B = 0,305(H_b/L_b)^{1/3} - 0,15</math></p> <p>Para <math>L_b &gt; 2H_b</math>:  <math>A = 1,75</math>  <math>B = 0,25</math></p>	$H_b + 1,6H_b \exp\left(-1,3 \frac{L_b}{H_b}\right)$	$1,1W_b + 1,7W_b \exp\left(-0,53 \frac{W_b}{H_b}\right)$

Tab. 3-3 Modelos analíticos para o cálculo do comprimento, altura e largura da zona de recirculação.

A fórmula para o cálculo do ponto de estagnação considerando o deslocamento do plano de referência  $H_s$  é calculada assumindo uma variação linear de  $H_s$  com  $d$ :

$$\frac{H_s}{H} = 0,85 + 0,15 \frac{\bar{H}}{H} (1 - 1,25\lambda_p(1 - \lambda_p))$$

[ 3.31 ]

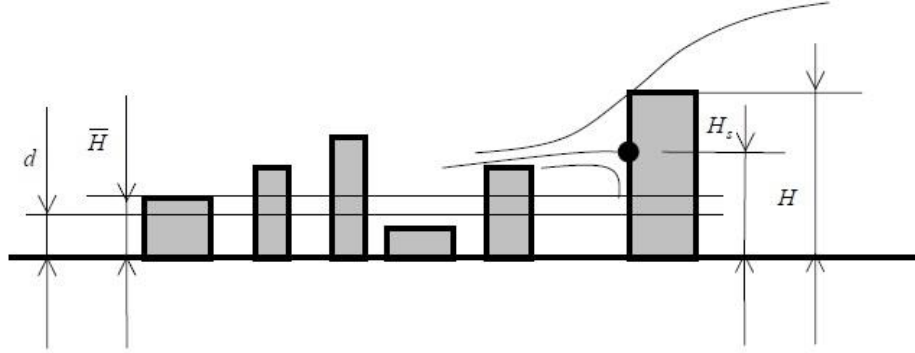


Fig. 3-14 Altura do ponto de estagnação do escoamento incidente sobre a fachada de um edifício (Mertens, 2006).

### 3.4.2 Os Desfiladeiros Urbanos

Os desfiladeiros urbanos são configurações muito comuns em ambiente urbano, constituídos por duas filas paralelas de edifícios iguais. Um dos primeiros estudos foi realizado sobre um modelo físico caracterizado por uma secção do desfiladeiro quase quadrada e uma relação entre a sua largura  $W_s$  e a altura dos edifícios  $H_b$  unitária (Nakamura & Oke, 1988). Observou-se que quando a direcção do vento é perpendicular às filas de edifícios, dá-se origem a uma zona de recirculação na região interna ao desfiladeiro. Ao variar o ângulo de incidência do vento, o movimento de recirculação deixa de ser circular tornando-se helicoidal, até desaparecer quando a direcção do vento é paralela ao eixo do desfiladeiro. Em tal caso o escoamento resulta acelerado por efeito Venturi<sup>18</sup>, uma vez que a secção transversal do desfiladeiro sofre um restringimento devido à formação de bolhas de separação nos bordos internos. O mesmo estudo fornece uma relação entre a velocidade do vento na zona de recirculação ao nível da estrada (a uma cota igual a  $0,06H_b$ ) e no topo dos edifícios (a uma cota igual a  $1,2H_b$ ):

$$\frac{U_{1,2H_b}}{U_{0,06H_b}} = \frac{3}{2}$$

[ 3.32 ]

A análise da estrutura da zona de recirculação para diferentes relações de forma  $W_s/H_b$  foi investigada através de simulações em CFD (Sini, Anquetin, & Mestayer, 1996). Na tabela seguinte, reportam-se os principais resultados obtidos:

<sup>18</sup> A velocidade de um fluido em movimento numa conduta fechada aumenta, face à diminuição de pressão, quando o fluido encontra um restringimento da secção transversal da conduta.

$\frac{W_s}{H_b} < 0,6$	O turbilhão que se forma não atinge a superfície da estrada, dando origem a um turbilhão secundário mais fraco que roda em sentido contrario.
$\frac{W_s}{H_b} > 5$	O núcleo do turbilhão começa a se dividir em dois, dando origem a dois centros de circulação local, um atrás dos edifícios a montante e outro à frente dos edifícios a jusante.
$\frac{W_s}{H_b} > 9$	Os dois turbilhões são completamente separados, implicando a religação da zona de separação atrás dos edifícios a montante, antes que seja atingida a segunda fila de edifícios.
$\frac{W_s}{H_b} \gg 9$	Não existe interacção entre os efeitos das duas filas de edifícios. O escoamento volta a condição de equilíbrio antes que a segunda fila tenha algum efeito.

**Tab. 3-4 Descrição das características da zona de recirculação nos Street Canyons em função de diferentes valores da relação de forma (Sini, Anquetin, & Mestayer, 1996).**

Mediante ensaios em túnel de vento sobre um modelo físico bidimensional constituído por uma serie de estradas paralelas compreendidas entre pares de blocos de edifícios, foram comparados os efeitos da densidade superficial e da forma das coberturas dos edifícios sobre o escoamento (Rafailidis, 1997). A influência dos edifícios sobre o vento incidente é limitada a uma altura igual a três vezes a altura média dos edifícios considerados. Mais em particular, os efeitos sobre o escoamento resultantes da variação na forma das coberturas resultam muito maiores, se comparados com os efeitos devidos à variação na densidade superficial. Ao aproximar do limite da CCU, a presença de coberturas inclinadas determina um abrandamento do vento e um aumento da intensidade de turbulência significativos comparativamente com as coberturas planas. A influência que a geometria das coberturas exerce sobre o comprimento de rugosidade também foi quantificada, estimando-se um incremento de  $z_0$  igual a 4,5 e 12,5 vezes, para valores da relação de forma  $W_s/H_b$  iguais a 1 e 0,5, respectivamente.

### 3.5 Turbulência

Num escoamento turbulento a velocidade do vento varia significativamente de forma irregular, no tempo e no espaço. A turbulência no vento é caracterizada pela dissipação da energia cinética em energia térmica através da geração e destruição de redemoinhos progressivamente mais pequenos. Variações de velocidade do vento com períodos entre um segundo e 10 minutos e que têm um caracter estocástico são considerados fenómenos turbulentos. Tipicamente, os valores médios em intervalos temporais de 10 minutos são determinados utilizando uma taxa de amostragem de acerca 1 segundo.

Os fenómenos turbulentos são normalmente descritos pela intensidade de turbulência  $I$ , definida como a razão entre o desvio padrão da velocidade do vento  $\sigma_u$  e o seu valor médio  $\bar{u}$ :

$$I = \frac{\sigma_u}{\bar{u}}$$

[ 3.33 ]

$$\sigma_u = \sqrt{\overline{u^2}} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u^2 dt}$$

[ 3.34 ]

Normalmente, os valores máximos da intensidade de turbulência verificam-se para ventos com baixas velocidades.

O desvio padrão da velocidade do vento pode ser escrito também em função da velocidade de atrito (Panofsky & Dutton, 1984):

$$\sigma_u = 2,4u_*$$

[ 3.35 ]

Substituindo nesta expressão a fórmula para o cálculo da intensidade de turbulência e a Lei Logarítmica para o meio-urbano, obtém-se:

$$I = \frac{1}{\ln \left| \frac{z-d}{z_0} \right|}$$

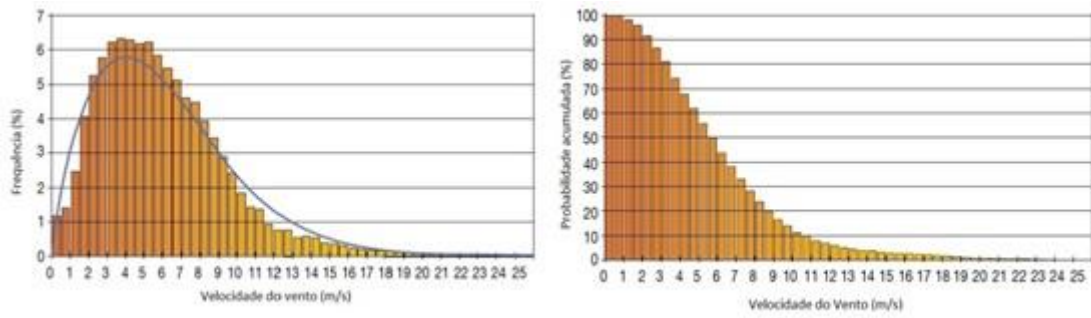
[ 3.36 ]

Esta fórmula, aplicável para  $z > z_{min}$ , mostra o incremento da intensidade de turbulência ao aumentar da rugosidade e ao diminuir da cota acima do terreno.

## 3.6 A Análise Estatística

A avaliação do potencial eólico de um determinado local, bem como a potência extraível do vento, é possível através duma análise estatística, que se torna necessária quando é preciso projetar dados disponíveis em outros locais. Este tipo de análise consiste no utilizo de uma função de densidade de probabilidade, que permite estimar a frequência de ocorrência da velocidade média do vento e de uma função de distribuição acumulada (*Fig. 3.14*), que indica a probabilidade da velocidade do vento ser inferior ou igual a um determinado valor (Manwell, McGowan, & Rogers, 2002).





**Fig. 3-15 (Esquerda) Histograma da frequência de ocorrência da velocidade média do vento. (Direita) Histograma da probabilidade acumulada da velocidade média do vento (ABB, 2011).**

Ambas as descrições probabilísticas costumam ser descritas através da lei de distribuição e a distribuição acumulada de Weibull, sendo as leis que se adaptam melhor a gama de velocidades de interesse:

$$f(\bar{u}) = \frac{k}{A} \left( \frac{\bar{u}}{A} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{\bar{u}}{A} \right)^k \right) \quad [ 3.37 ]$$

$$F(\bar{u}) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{\bar{u}}{A} \right)^k \right) \quad [ 3.38 ]$$

Onde:

- $f(\bar{u})$  = frequência de ocorrência da velocidade média do vento;
- $F(\bar{u})$  = probabilidade acumulada da velocidade média do vento;
- $A$  = parâmetro de escala (m/s);
- $k$  = parâmetro de forma adimensional.

Uma vantagem da lei de distribuição de Weibull é que pode ser completamente identificada uma vez conhecidos os parâmetros de forma e de escala. Fisicamente, o parâmetro de forma representa a “dispersão” dos valores de velocidade da velocidade media. Quanto maior for o seu valor, maior será a dispersão. Mais em particular, para  $k = 1$ , a distribuição degenera numa distribuição exponencial negativa, enquanto, para  $k = 2$ , obtém-se a distribuição de Rayleigh. O parâmetro de escala está ligado univocamente à velocidade média, pelo que pode ser interpretado como um indicador de ventosidade (Fig.3.15).

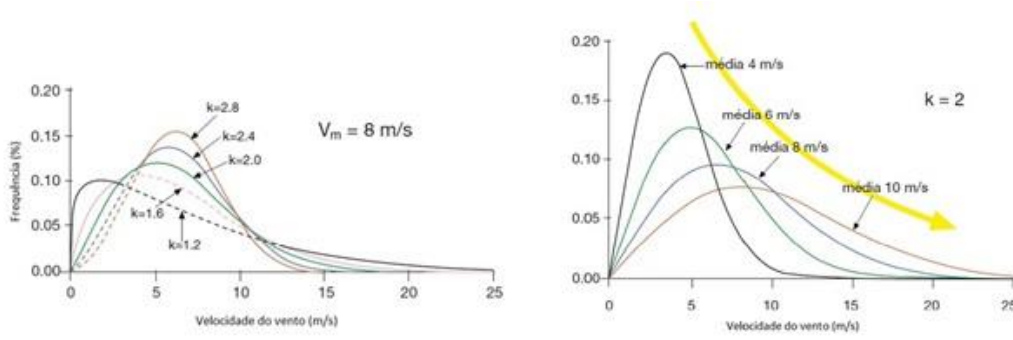


Fig. 3-16 (Esquerda) Influência do parâmetro de forma sobre a função de distribuição de Weibull. (Direita) Influência do parâmetro de escala sobre a função de distribuição de Weibull (ABB, 2011).

Dados dois valores de velocidade do vento  $\bar{u}_1$  e  $\bar{u}_2$ , com  $\bar{u}_1 < \bar{u}_2$ , a probabilidade  $P_{u_2}^{u_1}$  que a velocidade efectiva do vento  $v$  seja compreendida entre tais valores é calculável a partir da lei de distribuição como:

$$P_{u_2}^{u_1} = \int_{u_1}^{u_2} f(\bar{u}) du = \left[ -\exp \left[ -\left( \frac{\bar{u}}{A} \right)^k \right] \right]_{u_1}^{u_2} = \exp \left[ -\left( \frac{\bar{u}_1}{A} \right)^k \right] - \exp \left[ -\left( \frac{\bar{u}_2}{A} \right)^k \right] \quad [3.39]$$

Analogamente calcula-se a probabilidade que a velocidade esteja acima ou abaixo de um determinado valor:

$$P_{\infty}^{u_x} = \int_{u_x}^{\infty} f(\bar{u}) du = \exp \left[ -\left( \frac{\bar{u}_x}{A} \right)^k \right] \quad [3.40]$$

$$P_{u_x}^0 = \int_0^{u_0} f(\bar{u}) du = 1 - \exp \left[ -\left( \frac{\bar{u}_x}{A} \right)^k \right] \quad [3.41]$$

Estas expressões podem ser utilizadas para a estimativa de ocorrência dos ventos extremos.

A velocidade média do vento pode ser calculada a partir da lei de distribuição, dividindo o campo de velocidade em vários intervalos, multiplicando o valor da velocidade centrado em cada intervalo pela frequência de ocorrência e pela amplitude do intervalo correspondentes. Logo, somando todos os produtos. Isto equivale a dizer:

$$\bar{u} = \int_0^{\infty} f(\bar{u}) du = A \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad [3.42]$$

Sendo:

- $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$ , Função Gama.

É importante realçar a necessidade da distribuição estatística da velocidade do vento para o cálculo da potência extraível do vento, uma vez que a utilização de valores médios produziria resultados errados. De facto, a função de probabilidade de ocorrência da velocidade do vento deve ser pesada pela correspondente factor de conversão de energia  $k_e = \overline{U^3} / \bar{U}^3 > 1$ , uma vez que  $\overline{U^3} \neq \bar{U}^3$ .

## 4 As Turbinas Eólicas Urbanas

---

Existem diferentes tipologias de sistemas capazes de aproveitar a energia eólica no meio urbano. Uma primeira distinção pode ser feita entre sistemas não integrados nos elementos urbanos que produzem energia em larga escala, análogos às grandes turbinas eólicas erigidas nos ambientes rurais, e os pequenos sistemas concebidos para se integrar e interagir com o ambiente construído, tendo em conta as complexas características do escoamento urbano.

Após décadas de experiência e investimentos, a produção eólica em larga escala é hoje em dia um sector bem afirmado. Nas áreas urbanas existem maiores restrições quer em termos de disponibilidade do recurso eólico, quer de impactes ambientais. Contudo, os projectos de energia eólica urbana não deixam de ser viáveis em zonas onde existe uma ampla disponibilidade do recurso, como as áreas costeiras ou em altitudes elevadas.

Isto não se pode ainda afirmar quanto aos pequenos sistemas de energia eólica inseridos no ambiente construído. De facto, a complexidade do fenómeno, a pouca maturidade do sector e a falta de um esquema de certificação, resultam em frequentes situações de fracasso que ameaçam a imagem do sector e causam a perda de confiança por parte dos investidores.

Sendo o presente trabalho particularmente focado sobre a avaliação do potencial eólico em áreas onde o escoamento interage com os elementos urbanos, neste capítulo serão inicialmente descritos os princípios de funcionamento das turbinas eólicas integradas em edifícios, apresentando vantagens e desvantagens. Após uma análise das principais tendências do mercado europeu de pequenas turbinas eólicas, serão apresentados os dados técnicos e prestacionais de diferentes tecnologias existentes.

### 4.1 *Building-Augmented Wind Turbines (BAWT)*

Muito embora no meio urbano a velocidade média do vento seja sensivelmente inferior que nas áreas rurais, existem zonas, perto dos edifícios, onde pode atingir valores suficientemente elevados e garantir uma produção energética aceitável. De facto, qualquer corpo submerso no escoamento provoca a sua aceleração em determinadas regiões próximas da superfície do mesmo corpo. No meio urbano, tal aceleração pode ser originada também pelo efeito de concentração, que por vezes resulta do perfil aerodinâmico dos edifícios ou da particular configuração do tecido urbano, ou ainda do gradiente de pressão que se estabelece nas fechadas dos edifícios. A estes princípios aerodinâmicos correspondem três configurações elementares de turbinas, conhecidas com o acrónimo inglês *BAWT*<sup>19</sup> (*Fig.4.1*):

---

<sup>19</sup> *Building-Augmented Wind Turbine.*

- perto (em cima ou aos lados) de edifícios;
- entre edifícios com perfil aerodinâmico;
- integradas nas fechadas dos edifícios.

Todas as outras possíveis configurações de *BAWT* resultam da combinação destas três. O facto de o efeito de concentração ocorrer apenas em zonas próximas dos edifícios, constitui uma ulterior limitação para a dimensão do rotor eólico. Dimensões maiores que o 20% da dimensão característica do edifício resultam desnecessários, além de causar uma redução do coeficiente de potência (Mertens, 2002).

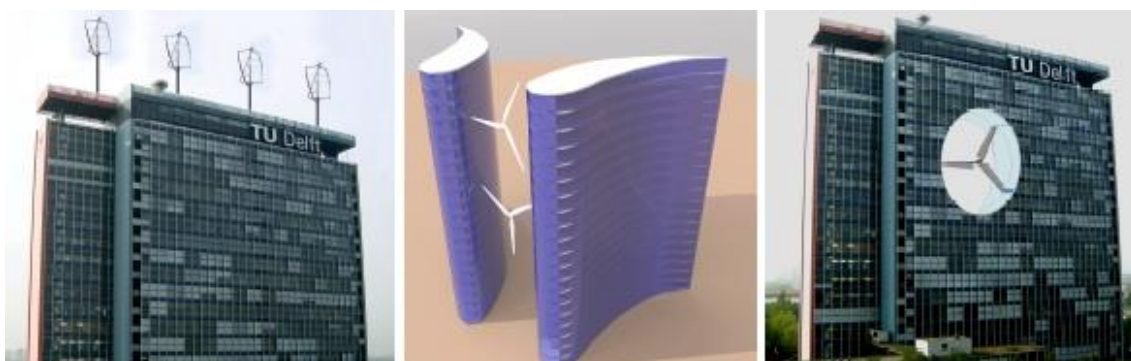


Fig. 4-1 Representações artísticas das três configurações elementares de *Building-Augmented Wind Turbines*. Da esquerda: *BAWT* sobre a cobertura de um edifício; *BAWT* entre edifícios com perfil aerodinâmico; *BAWT* integrada na fachada do edifício.

#### 4.1.2 *BAWT* perto de edifícios

Esta configuração é a mais fácil de realizar, uma vez que não requer substanciais alterações arquitectónicas do edifício, e pode ser instalada também em edifícios existentes. Particular atenção deve ser posta na localização das turbinas. O tubo de fluxo, onde se realiza a extracção da energia eólica, não deve interceptar as zonas de recirculação que se formam a partir dos bordos do edifício, tipicamente formando um ângulo de  $45^\circ$  com a superfície considerada. Posicionando as turbinas nas coberturas é possível atingir elevadas eficiências aerodinâmicas. A altura da torre deve ter uma elevação tal que permita evitar zonas com elevados níveis de turbulência e baixas velocidades do vento. Contudo, é necessário ter em consideração um conjunto de efeitos secundários indesejados, como a pior acessibilidade da turbina para as operações de manutenção, o aumento das vibrações induzidas sobre o edifício e o maior impacto visual. Para reduzir estes efeitos é possível instalar as turbinas em fachadas com bordos arredondados. Desta forma reduz-se a altura da zona de recirculação, possibilitando a instalação de torres de menores dimensões. O efeito de aceleração assim obtido dará origem a um incremento de energia de cerca 15%, relativamente a uma turbina equivalente livre, posta a mesma altura (*Tab.4.1*). Relativamente à configuração com turbinas instaladas aos lados dos edifícios a energia diminui de cerca 80 – 90% (Stankovic, Campbell, & Harries, 2009). Neste caso, é necessário ter em conta as seguintes limitações:

- a orientação da turbina na direcção do vento pode resultar complicada, pelo que se preferem turbinas a eixo vertical;
- a área varrida deve ser maximizada, mediante instalação de mais turbinas;
- as zonas dos edifícios adjacentes às turbinas devem ser isoladas termicamente e acusticamente;
- prefere-se a utilização de modelos de turbina mais robustos, uma vez que o acesso para as operações de manutenção pode ser complicado.

#### **4.1.2 BAWT entre edifícios com perfil aerodinâmico**

Nesta configuração os edifícios são posicionados de forma a agir como um concentrador. Diversos ensaios, realizados sobre turbinas de eixo horizontal com concentradores circulares, demonstram a possibilidade de atingir elevadas eficiências aerodinâmicas, em comparação com outras possíveis soluções. No caso de turbinas instaladas entre edifícios com perfil aerodinâmico, o efeito de concentração é fortemente influenciado pelo comprimento dos edifícios, que, para obter elevados ganhos em termos de eficiências aerodinâmica, deve ser grande. Esta condição torna a configuração em exame dificilmente integrável no ambiente urbano. Mediante instalação de turbinas entre edifícios não otimizados em termos aerodinâmicos, também é possível obter efeitos de aceleração satisfatórios, resultando num incremento de energia da ordem do 10%, comparativamente a uma turbina equivalente livre, posta a mesma altura. (Stankovic, Campbell, & Harries, 2009). Em ambas as situações existem algumas limitações a ter em conta:

- o desempenho das turbinas é fortemente influenciado pela direcção do vento e pela orientação e forma dos edifícios;
- a orientação da turbina na direcção do vento pode resultar complicada, pelo que se preferem turbinas a eixo vertical;
- a área varrida deve ser maximizada, mediante instalação de mais turbinas;
- as zonas dos edifícios adjacentes as turbinas necessitam de isolamento térmico e acústico;
- prefere-se a utilização de modelos de turbina mais robustos, uma vez que o acesso para as operações de manutenção pode ser complicado.

#### **4.1.3 BAWT integradas nas fachadas de edifícios**

Contrariamente às configurações anteriores, o princípio de funcionamento das turbinas integradas nas fachadas dos edifícios baseia-se essencialmente na capacidade de captar o vento prevalente e acelera-lo, agindo como um concentrador. O escoamento concentrado no plano da turbina integrada na estrutura do edifício é portanto pouco influenciado pela direcção do vento incidente. De forma a maximizar a diferencia de pressão entre as duas fachadas, é oportuno limitar as zonas de recirculação que se formam por causa da separação

do escoamento nas bordas do edifício, ou através do arredondamento das mesmas, ou realizando edifícios com forma bidimensional. Esta semelhança permite um incremento de produção energética até 50%, comparativamente a uma turbina análoga livre, posta a mesma altura. (Tab.2.2). Algumas limitações a ter em conta são:

- as zonas do edifícios adjacentes às turbinas necessitam de isolamento térmico e acustico;
- quando necessária, a orientação da turbina na direcção do vento pode resultar complicada, pelo que preferem-se turbinas a eixo vertical;
- quando não é necessária a orientação da turbina na direcção do vento, podem ser utilizadas turbinas a eixo horizontal fixas, dotadas de controlo activo do angulo de passo, que permitem o seu funcionamento para ventos bidireccionais.

Configuração BAWT	Factor de Concentração de Energia para tipo de vento			
	Uniforme	Com direcção prevalente semanal	Fortemente unidireccional	Bidireccional
Em cima do edifício	1,12	1,12	1,12	1,12
Em cima do edifício (bordas arredondadas)	1,15	1,15	1,15	1,16
Aos lados do edifício	0,78	0,81	0,84	0,88
Entre dois edifícios	0,99	1,03	1,07	1,13
Integradas na fachada do edifício	1,35	1,39	1,43	1,51

**Tab. 4-1 Relação entre a energia produzida por diferentes configurações de BAWT e as turbinas equivalentes postas à mesma altura, mas não vinculadas a nenhum edifício, por diferentes tipologias de vento (Stankovic, Campbell, & Harries, 2009).**

Um famoso exemplo de BAWT integradas na fachada do edifício, símbolo da recente tendência de construir edifícios sempre mais “sustentáveis”, é o projecto futurista WEB, realizado pela Universidade de Estugarda. O edifício é composto por duas torres gémeas, entre as quais se integram três turbinas fixas de eixo horizontal com 35m de diâmetros e potência nominal igual a 250kW. Embora as turbinas fixas não permitam captar o vento proveniente de qualquer direcção, o perfil aerodinâmico das duas torres é realizado de forma a concentrar ventos com ângulos de incidência até  $\pm 75^\circ$  relativamente à direcção do vento prevalente (com o eixo da turbina alinhado com esta direcção). Mesmo quando o vento incide com um ângulos maiores que  $\pm 75^\circ$ , é possível obter algum ganho energético. Por fim, com a incidência do vento prevalente, a concentração permite a extracção do dobro da energia (Stankovic, Campbell, & Harries, 2009).

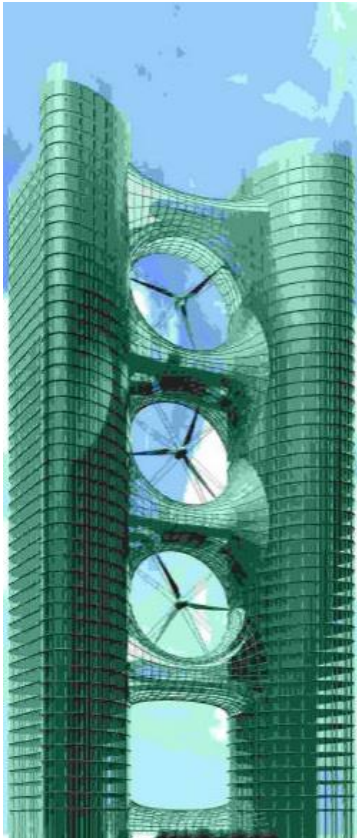


Fig. 4-2 Projecto WEB,  
Universidade de Estugarda.

Em termos de investimento existem sobrecustos associados à optimização aerodinâmica da estrutura e aos dispositivos de controlo das vibrações. Por outro lado, é possível poupar sobre as operações de manutenção, que para turbinas fixas são reduzidas, e sobre os custos de torres.

Contrariamente a quanto se possa pensar, o aspecto mais crítico relativo à realização de sistemas deste género tem a ver com a produção de energia. Embora exista uma correspondência quadrática entre energia produzida e diâmetro do rotor eólico, para uma correcta avaliação de desempenho do sistema é preciso considerar também a energia requerida pela utilização do edifício. As turbinas de grande diâmetro podem apenas ser integradas em grandes edifícios, constituídos por um elevado número de fracções, logo com necessidades energéticas elevadas. Contudo, mesmo que resulte uma produção da ordem de 1 – 2% da energia necessária, é oportuno considerar as vantagens de carácter social, como por exemplo a sensibilização a um uso racional da energia por parte dos utilizadores.

## 4.2 Modelos existentes de turbinas eólicas urbanas

### 4.2.1 As tendências do mercado europeu

Em 2005, foi publicado o *Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers*, que recolhe os dados técnicos da maioria dos modelos de turbinas eólicas classificáveis como turbinas eólicas urbanas presentes no mercado. O resultado foi a catalogação de 57 modelos de turbinas eólicas urbanas, correspondentes a 32 fabricantes europeus. Destes 65% corresponde a turbinas de eixo horizontal, enquanto os restantes 35% representam turbinas de eixo vertical.

Analisando os principais dados técnicos apresentados no catálogo, é possível perceber quais são as tendências em termos prestacionais das turbinas eólicas urbanas presentes no mercado. Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na *Tabela 4.2*.

Tipicamente as turbinas eólicas são classificadas em relação à potência nominal, ou seja a potência máxima gerada em condições normais de operação. As turbinas catalogadas compreendem turbinas com potências nominais entre 100W e 100kW, sendo que na maioria



dos casos não ultrapassa os  $10kW$ . Analogamente, a velocidade nominal do vento representa a velocidade para a qual a turbina opera à potência nominal. No meio urbano, importa que esta seja a mais baixa possível, de forma a maximizar a potência produzida para o maior tempo possível. 46% dos modelos catalogados apresentam valores compreendidos entre 11 e  $13m/s$ .

A velocidade de arranque (*Cut-in*) representa a velocidade do vento para a qual a potência produzida é suficientemente grande para ser utilizável pela aplicação específica. Pelo contrário, à velocidade de segurança (*Cut-out*) a turbina deixa de trabalhar, de forma a evitar velocidades de rotação excessivas que provocariam danos na máquina. Os resultados mostram que para a maioria das turbinas a velocidade de arranque é inferior a  $3m/s$ , e que a maioria dos modelos é capaz de resistir aos ventos extremos, pelo que não dispõem de mecanismos activos ou passivos de regulação.

95% não necessita de energia eléctrica para o arranque, mas começa a trabalhar de forma passiva.

Embora não sejam apresentados os dados sobre o ruído de todos os modelos, os dados presentes mostram bons resultados, de acordo com as considerações mencionadas anteriormente. O nível de pressão sonora medido no do ponto de emissão, para uma velocidade do vento de  $5m/s$ , é para 37% dos casos inferior a  $40dB$ ; para 27%, atinge valores não relevantes, podendo-se classificar como não audível.

Relativamente à vida útil do equipamento 68% apresenta uma longevidade compreendida entre 20 e 25 anos.

40% dos fabricantes consultados afirma que os próprios produtos não necessitam de nenhum tipo de manutenção. Os restantes assinalam apenas a necessidade de proceder à lubrificação do equipamento duas vezes por ano, ou de realizar um controle preventivo anualmente.

Velocidade nominal do vento		Velocidade de <i>Cut-in</i>		Velocidade de <i>Cut-out</i>		Ruído ( $v=5m/s$ )		Vida útil	
[m/s]	[%]	[m/s]	[%]	[m/s]	[%]	[dB]	[%]	[anos]	[%]
$v < 11$	26	Sem	0	<b>Sem</b>	<b>54</b>	Sem	26	$\alpha > 25$	5
<b><math>11 \leq v &lt; 13</math></b>	<b>46</b>	<b><math>v &lt; 3</math></b>	<b>47</b>	$v \geq 20$	36	<b><math>L_p \leq 40</math></b>	<b>37</b>	<b><math>20 \leq \alpha &lt; 25</math></b>	<b>68</b>
$13 \leq v < 17$	21	$3 \leq v < 4$	38	$15 \leq v < 20$	7	$40 \leq L_p < 60$	24	$15 \leq \alpha < 20$	20
$v \geq 17$	7	$v \geq 4$	14	$10 \leq v < 15$	3	$60 \leq L_p < 80$	13	$10 \leq \alpha < 15$	7


**Tab. 4-2** Análise comparativa dos principais dados técnicos apresentados no Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers, relativos a 52 modelos de turbinas eólicas urbanas presentes no mercado em 2005.

## 4.2.2.Exemplos de turbinas urbanas

Apresentam-se de seguida alguns dos modelos de turbinas eólicas urbanas presentes no mercado. A selecção dos modelos foi realizada apenas com o intuito de mostrar diferentes tecnologias existentes e comparar os relativos dados técnicos e parâmetros prestacionais.


### Proven

As turbinas Proven são turbinas de sustentação com eixo horizontal, rotor com três pás e do tipo *Downwind*. As potências nominais variam de 2,5 a 15 *kW*, consoante o modelo.

Modelo	Proven 2,5	Proven 6	Proven 15	
Potência nominal [W]	2500	6000	15000	
Cut in [m/s]	2,5	2,5	2,5	
Cut out [m/s]	n.a.	n.a.	n.a.	
V. vento máx. [m/s]	70	70	70	
V. vento nominal [m/s]	12	12	12	
Tipo de rotor	HAWT, Downwind	HAWT, Downwind	HAWT, Downwind	
Número de pás	3	3	3	
Diâmetro do rotor [m]	3,5	5,5	9	
Rpm nominais	300	200	150	
Peso [kg]	190	600	1100	
Sistema de travagem	Mecânico	Mecânico	Mecânico	
Ruído 5m/s [dBA]	40	45	48	
Ruído 20 m/s [dBA]	60	65	65	


### Ampair

As turbinas Ampair são turbinas de sustentação a eixo horizontal com três pás e do tipo *Upwind*. As potências nominais variam de 0,1 a 0,6 *kW*, consoante o modelo. São projectadas para ser instaladas também em barcos.

Modelo	Ampair 100	Ampair 300	Ampair 600	
Potência nominal [W]	100	300	698	
Cut in [m/s]	2,5	3	3	
Cut out [m/s]	n.a.	n.a.	n.a.	
V. vento máx. [m/s]	70	n.a.	n.a.	
V. vento nominal [m/s]	12	12,6	11	
Tipo de rotor	HAWT, Upwind	HAWT, Upwind	HAWT, Upwind	
Número de pás	3	3	3	
Diâmetro do rotor [m]	0,93	1,3	1,7	
Rpm nominais	n.a.	n.a.	n.a.	
Peso [kg]	12,5	10,5	16	
Sistema de travagem	n.a.	Controlo do passo	Controlo do passo	
Ruído 5m/s [dBA]	n.a.	n.a.	Máx. 1-3 dBA acima do ruído ambiente	
Ruído 20 m/s [dBA]	n.a.	n.a.		

## **T. Urban**


A T. Urban é uma turbina de sustentação a eixo horizontal com três pás e do tipo *Upwind*, realizada no âmbito do projecto DEMETEC, coordenado pelo LNEG<sup>20</sup>. É uma turbina concebida para ser instalada no meio urbano, pelo que é de fácil integração em edifícios, quer em termos estruturais que eléctricos. A sua particularidade mais importante consiste no perfil aerodinâmico das pás, capaz de maximizar a extracção de energia para valores de velocidades do vento reduzidas. De facto, a secção das pás foi desenhada de forma a obter uma distribuição quase constante da pressão de carga ao longo da corda, resultando no incremento do valor máximo da força de sustentação (Henriques, Silva, Estanqueiro, & Gato, 2009).

Modelo	T.Urban	
Potência nominal [W]	2500	
Cut in [m/s]	3,5	
Cut out [m/s]	25	
V. vento máx. [m/s]	n.a.	
V. vento nominal [m/s]	13,5	
Tipo de rotor	HAWT, Upwind	
Número de pás	3	
Diâmetro do rotor [m]	2,3	
Rpm nominais	n.a.	
Peso [kg]	n.a.	
Sistema de travagem	n.a.	
Ruído 5m/s [dBA]	n.a.	
Ruído 20 m/s [dBA]	n.a.	

## **QuietRevolution**

A QuietRevolution é uma turbina de sustentação a eixo vertical com três pás helicoidais. Esta última característica permite reduzir as vibrações induzidas pelas variações do ângulo de ataque que, nas turbinas de tipo Darrieus convencionais, dão origem a uma variação das solicitações mecânicas nas pás, duas vezes por rotação. É particularmente indicada para operar em locais sujeitos a frequentes variações de direcção do vento. A sua forma helicoidal permite também atenuar substancialmente o ruído.

Modelo	QuietRevolution
Potência nominal [W]	6000
Cut in [m/s]	4,5
Cut out [m/s]	16
V. vento máx. [m/s]	n.a.
V. vento nominal [m/s]	12,5
Tipo de rotor	VAWT
Número de pás	3
Diâmetro do rotor [m]	3,1 (altura = 5m)
Rpm nominais	n.a.
Peso [kg]	n.a.
Sistema de travagem	Accionamento eléctrico
Ruído 5m/s [dBA]	Abaixo do nível de ruído ambiente
Ruído 20 m/s [dBA]	




<sup>20</sup>Laboratório Nacional de Energia e Geologia (ex-INETI).

## Turby


A Turby é uma turbina de sustentação a eixo vertical com três pás helicoidais, cujo princípio de funcionamento é análogo ao da QuietRevolution. Tem uma potência nominal de 2,5kW.

Modelo	Turby
Potência nominal [W]	2500
Cut in [m/s]	4
Cut out [m/s]	14
V. vento máx. [m/s]	55
V. vento nominal [m/s]	14
Tipo de rotor	VAWT
Número de pás	3
Diâmetro do rotor [m]	2 (altura = 2,65m)
Rpm nominais	120-400
Peso [kg]	136
Sistema de travagem	Accionamento eléctrico
Ruído 5m/s [dBA]	n.a.
Ruído 20 m/s [dBA]	



## Energy Ball

Esta turbina é caracterizada por seis pás curvilíneas que rodam a volta de um eixo horizontal. A diferencia das turbinas Darrieus convencionais, o vento incide no rotor paralelamente ao eixo de rotação. O princípio de funcionamento é baseado no efeito Venturi. Durante a rotação das pás, o vento é comprimido originando uma depressão no interior da esfera. A diferencia de pressão que se estabelece, permite ao ar que circula em proximidade da sua superfície de penetrar dentro da esfera, contribuindo para a rotação das pás.

Modelo	Energy Ball V100	
Potência nominal [W]	500 (100 para v=10m/s)	
Cut in [m/s]	2	
Cut out [m/s]	n.a.	
V. vento máx. [m/s]	40	
V. vento nominal [m/s]	14	
Tipo de rotor	HAWT	
Número de pás	6	
Diâmetro do rotor [m]	1,1 (compr. = 1,3m)	
Rpm nominais	n.a.	
Peso [kg]	n.a.	
Sistema de travagem	Accionamento eléctrico	
Ruído 5m/s [dBA]	n.a.	
Ruído 20 m/s [dBA]		

Na figura seguinte são representadas as curvas  $C_p - v$  para os modelos de turbinas eólicas apresentados. Os dados foram calculados com base nas curvas de potência, na maioria dos casos apenas teóricas, fornecidas pelos fabricantes nas próprias páginas internet ou catálogos. Aos diferentes andamentos das curvas correspondem diferentes características prestacionais. A análise das curvas fornece indicações sobre as gamas de velocidades do vento para as quais o coeficiente de potência é máximo, possibilitando a definição das condições do escoamento pelas quais operam de forma mais eficiente.

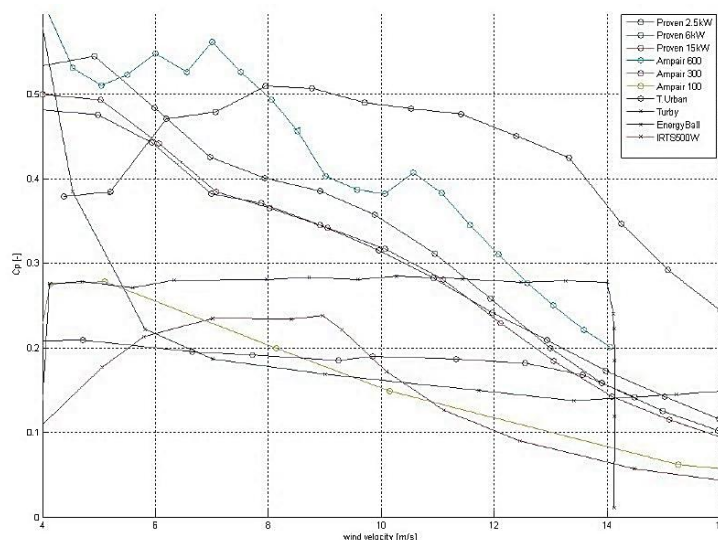


Fig. 4-3 Curvas  $C_p$ -v de diferentes modelos de turbinas eólicas urbanas.

## 4.3 Regulamentos e Certificação

O desenvolvimento de regulamentos e sistemas de certificação das turbinas eólicas urbanas, ainda em curso, é um instrumento necessário para garantir uma boa qualidade dos produtos no mercado e aumentar a confiança no sector por parte dos utilizadores, bem como favorecer o crescimento de um mercado “saúdavel”. A Comissão Electrotécnica Internacional TC88, publicou, em 2006, a segunda versão de 21 *Standards and Technical Specifications* para turbinas eólicas de larga e pequena escala. Em particular, os regulamentos que se referem as pequenas turbinas eólicas compreendem:

- IEC 61400-2 Ed 2 (projectação e segurança);
- IEC 61400-121 Anexo H (curvas de potência);
- IEC 61400-11 Anexo F (ruído);
- IEC 61400-22 (certificação).

Actualmente, a maioria dos fabricantes, mesmo tendo realizado ensaios sobre os próprios produtos para avaliar o desempenho de acordo com os regulamentos existentes, não terminou o procedimento completo de certificação, principalmente por causa dos elevados custos. O interesse em melhorar a qualidade do sector, impulsionado pelas iniciativas de incentivação realizadas em alguns países, como a introdução da *Feed-in-Tariff*, determinou a necessidade de simplificar o esquema de certificação e rever os regulamentos existentes. A terceira versão está actualmente em fase de elaboração, e deverá resolver algumas falhas importantes presentes na precedente versão, adaptando os regulamentos já existentes para as turbinas de larga escala. Entre as novidades que serão introduzidas, destacam-se:

- subdivisão em classe de pequenas turbinas eólicas;

- introdução de requerimentos técnicos em termos de projectação e segurança também para as VAWT, e para as estruturas de integração urbana;
- simplificação do procedimento de teste e certificação, e introdução de um sistema de etiquetagem e de fiscalização;
- procedimento básico para a avaliação de desempenho em áreas complexas.

## 5 O caso de estudo

---

De forma a comprovar a teoria apresentada nos capítulos anteriores, relativamente à energia eólica de pequena escala e aos factores que influenciam o aproveitamento do recurso eólico bem como à energia que poderá ser obtida em diferentes locais, será neste capítulo apresentado um estudo prático do tema proposto.

### 5.1 Caracterização da área de estudo

O presente estudo envolve a avaliação do potencial eólico em meio urbano. Neste contexto, pretende-se analisar as modificações induzidas pelos elementos de rugosidade sobre o campo de vento de uma área urbana com características morfológicas heterogéneas, de forma a individualizar as mais favoráveis para o aproveitamento da energia eólica. Foi escolhida uma parte do Bairro de Telheiras, como indicado em *Figura 5.1*, uma vez que os edifícios são caracterizados por uma ampla gama de formas e dimensões, agrupados em células distintas. Por ser uma área relativamente plana apresenta vantagens evidentes, porque os fluxos de ar resultam apenas da sua interacção com os edifícios, o que simplifica as conclusões e as extrapolações dos resultados para áreas semelhantes. A área estudada é ligeiramente orientada para sudoeste, apresentando um desnível de apenas 10m. A superfície apresenta apenas uma sobrelevação de cerca de 5 a 10m numa estreita faixa, que corresponde ao aterro construído para implantação do eixo Norte-Sul.



Fig. 5-1 Vista aérea de uma parcela do Bairro de Telheiras em Lisboa, obtida pelo Google Earth.



Como se mostra na *Figura 5.2*, a célula A é constituída por edifícios isolados do tipo torre, de implantação livre relativamente às ruas. A altura dos edifícios varia entre os 30 e os 45m. A célula é delimitada a Sul e Este por duas fiadas de edifícios com altura variável entre os 15 e os 25m.

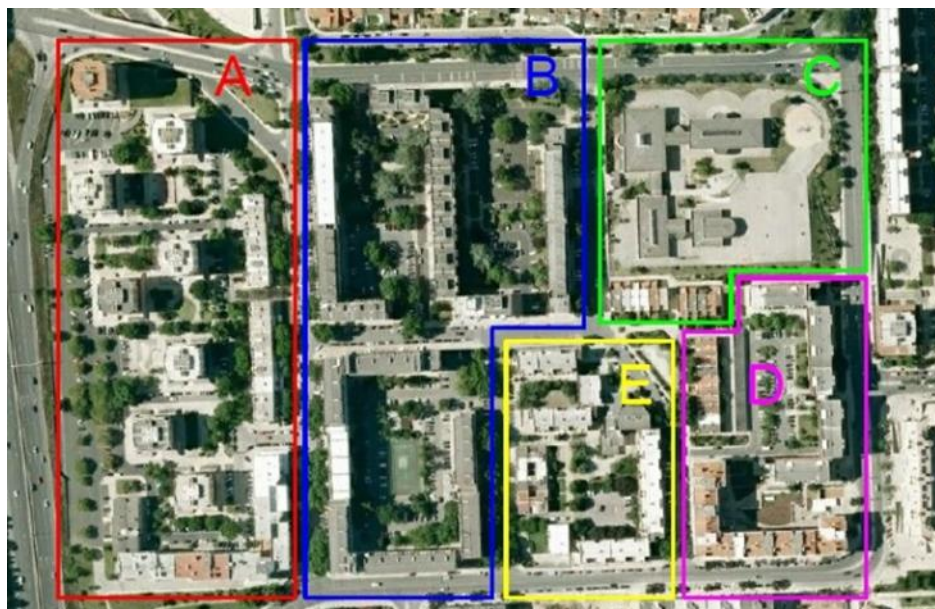


Fig. 5-2 Vista aérea da área de estudo com subdivisão em células, obtida pelo *Google Earth*.

A célula B é constituída por quatro conjuntos de edifícios com a mesma altura, igual a 25m, mas com formas diferentes. Os três conjuntos mais a Norte formam uma banda em “L”, outra em “Z” e outra simples. O conjunto mais a Sul forma uma banda em “O”.

A célula C é constituída por uma escola com altura mais reduzida relativamente às outras áreas, atingindo os 15m. A área de implantação é caracterizada por uma superfície aberta e com rugosidade reduzida.

As células D e E são constituídas por edifícios com alturas mais variáveis: de 3 a 30m e de 4 a 15m, respectivamente. Ambas formam espaços interiores mais ou menos fechados.

## 5.2 Metodologia

A validação dos resultados obtidos com modelos numéricos, se bem que sempre necessária, é uma tarefa de difícil concretização, porque, no caso do ambiente urbano, os dados do vento não abundam. De facto, o vento é um parâmetro meteorológico de difícil medição, devido aos efeitos que os edifícios e outros elementos urbanos têm na modificação instantânea da



velocidade e rumo do vento ao nível do solo. Além disso, a rede meteorológica é pouco densa na cidade, sobretudo para avaliar os regimes mais frequentes. Lisboa, por exemplo, é servida por uma rede de sete estações meteorológicas urbanas (RUEMA – Rede Urbana de Estações Meteorológicas Automáticas), instaladas pelo Instituto de Meteorologia (IM), das quais apenas duas fazem o registo do vento (rumo e intensidade).

Devido à escassez actual de dados de vento na cidade e à sua difícil recolha, validar os resultados obtidos com os modelos numéricos é uma tarefa que poderá ser desempenhada, com algum sucesso, através da construção de modelos físicos e a sua inclusão em túneis aerodinâmicos que reproduzem fielmente as situações do escoamento do ar em meio urbano.

Embora seja uma das formas mais correcta de avaliar os campos de vento e as suas modificações ao nível dos edifícios, a utilização de túneis aerodinâmicos apresenta alguma desvantagem:

- os ensaios estão condicionados à necessidade de definição de uma CLA com um perfil o mais próximo possível do real;
- a aquisição de dados através de instrumentos de medição é realizada de forma discreta (de ponto a ponto), comportando custos e tempos elevados, para a obtenção de informações detalhadas acerca do campo do escoamento considerado;
- a alteração da configuração do modelo físico pode constituir uma tarefa complicada, onerosa e pode requer muito tempo para a sua realização, tornando o método pouco flexível.

Uma alternativa válida, que permite contornar os problemas enunciados, consiste no recurso à Mecânica dos Fluidos Computacional (*CFD*<sup>21</sup>). Este método pode assemelhar-se a um túnel de vento virtual baseado nas leis fundamentais da fluido-dinâmica e que retorna soluções do campo de pressões e de velocidades do escoamento. A simulação por *CFD* permite a análise detalhada e rápida de cada ponto do modelo, em todo o seu domínio, possibilitando a visualização dos resultados de uma forma global. É um instrumento flexível, uma vez que a alteração do modelo é facilmente realizável. Comporta uma substancial redução nos custos associados e nos tempos. Contudo, é sempre aconselhável a validação do modelo mediante comparação parcial dos resultados obtidos com ensaios em túnel de vento.

Relativamente ao caso de estudo, realizaram-se os ensaios no túnel aerodinâmico com o intuito de validar o *software* de simulação, pelo que decidiu-se estudar os perfis de vento em altura de apenas dois pontos mais representativos. Desta forma, se a validação produzir resultados satisfatórios, será possível avançar numa análise mais detalhada da área de estudo apenas com o utilizo do *software*, tendo em conta os eventuais desvios individuados em fase de validação.

---

<sup>21</sup> *Computational Fluid Dynamics*.



Fig. 5-3 Imagem do Google Earth da vista aérea da área de estudo com indicação dos pontos de ensaio.

Como indicado na *figura 5.3*, o primeiro ponto escolhido corresponde a uma das torres de  $45m$  de altura localizadas na célula A, uma vez que esta é a altura maior de toda a área de estudo. O outro ponto corresponde a um pavilhão da escola situada a Nordeste, na célula C, com altura de  $12,5m$  e situado numa área relativamente aberta. Em cada ponto realizaram-se ensaios simulando duas direcções do vento principal, Norte e Sul. Definiram-se os seguintes casos:

- Caso 1: Torre com direcção do vento Norte;
- Caso 2: Escola com direcção do vento Norte;
- Caso 3: Torre com direcção do vento Sul;
- Caso 4: Escola com direcção do vento Sul.

## 6 CFD

### 6.1 O software de simulação ENVI-met

O *ENVI-met* é um modelo prognóstico tridimensional baseado nas leis fundamentais da fluidodinâmica e termodinâmica, que permite simular as interações entre superfícies, plantas e ar no ambiente urbano, com uma resolução de  $0,5\sim 10m$  no espaço, e de  $10sec$  no tempo. As aplicações típicas compreendem a Climatologia Urbana, Arquitectura, Projectação de Edifícios e Planeamento Urbano (Bruse, 2009). O modelo inclui a simulação de:

- escoamento em torno de edifícios;
- processos de troca de calor e vapor superficiais;
- turbulência;
- bioclimatologia;
- dispersão de partículas e poluentes;
- parâmetros vegetativos.

#### 6.1.1 O modelo tridimensional

No modelo tridimensional são definidos os elementos que representam a área de interesse, como edifícios, vegetação e diferentes tipos de superfície. De forma a possibilitar a aplicação do modelo numérico, a área de interesse é seccionada numa malha, cujas dimensões são definidas pelo utilizador, tendo influência sobre a resolução do modelo. Para garantir a correcta simulação dos processos da camada limite atmosférica, é necessário que o modelo se estenda até uma cota de pelo menos  $2500m$ .

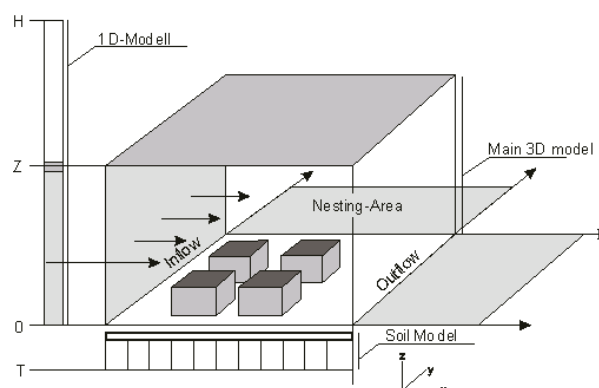


Fig. 6-1 Representação esquemática do modelo principal no ENVI-met (Bruse, 2009).

A simulação de um modelo tridimensional até esta cota, além de ser uma operação demasiado dispendiosa em termos de tempo e cálculos, é também desnecessária. Portanto é utilizado um

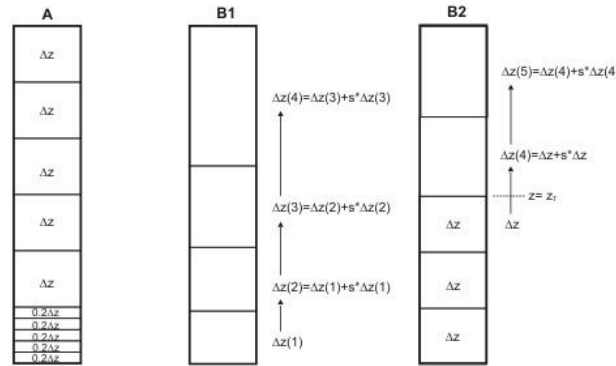
modelo unidimensional a partir do limite do modelo tridimensional, tipicamente 50~200m, que permite o cálculo dos perfis verticais de todas as variáveis em jogo. Outra estratégia utilizada para reduzir a quantidade de células no plano horizontal é a definição de uma área de nidificação, ou seja uma área externa à área de interesse, em que as dimensões das células aumentam progressivamente com a distância (Fig. 6.1).

O número máximo de células que é possível definir é bastante limitado, não sendo possível realizar simulações microclimáticas de cidades inteiras, mas apenas de bairros nelas contidos. O modelo *ENVI-met* utiliza uma malha uniforme com uma resolução máxima de 300x300x35 células, com uma extensão horizontal compreendida entre 0,5 e 10m e uma altura vertical típica de 1,5m.

Relativamente ao modelo tridimensional, é possível escolher entre duas configurações de malhas verticais: uma equidistante, onde todas as malhas, excepto as primeiras cinco, têm a mesma altura, e uma telescópica, onde a altura aumenta com a cota (Fig. 6.2). Na configuração telescópica, uma vez definida a altura de referência da malha superficial  $\Delta z_{ref}$  e o factor de extensão  $s$ , a altura da malha  $k$  é calculada como:

$$\Delta z_k = [1 + (s/100)]^{k-1} \Delta z_{ref} \quad [6.1]$$

Também é possível obter uma configuração mista, definido a cota onde se quer que comece a configuração telescópica.



**Fig. 6-2** Diferentes configurações de malhas verticais: (A) equidistante; (B1) telescópica, (B2) mista (Bruse, 2009).

Utilizando a configuração telescópica, a resolução do modelo diminui com a cota, pelo que se mostra particularmente indicada para modelos onde não se pretende conhecer acuradamente as propriedades da atmosfera nas camadas mais elevadas. A vantagem resulta na simplificação do modelo, cuja simulação será menos demorada.

Qualquer modelo numérico, e em particular o modelo tridimensional utilizado no *ENVI-met*, não é capaz de resolver as equações nos pontos correspondentes a fronteira. A definição de uma área de nidificação consegue resolver em parte o problema, uma vez que permite afastar a fronteira da área central do modelo. De tal forma, As variáveis calculadas na área de interesse não são influenciadas pelos erros contidos nas malhas extremas. Sendo que o

tamanho das malhas de nidificação aumenta com a distância da área central, a área de nidificação expande-se rapidamente. A sua resolução é calculada como:

$$dxy_{n+1} = dxy_n + dxy_{ref}$$

[ 6.2 ]

É também necessário definir o tipo de aproximação a utilizar para determinar os resultados nos pontos localizados na fronteira. Para tal é possível escolher três tipos de condições de contorno: forçadas, abertas ou cíclicas. Com as condições de contorno abertas, são copiados os valores contidos nas malhas adjacentes, internas ao modelo. É particularmente indicada para situações em que a estrutura da área externa ao modelo é parecida com a estrutura interna, mas bastante afastada dele, permitindo a parcial recuperação dos perfis verticais das variáveis consideradas às alterações induzidas pela interacção com os elementos do modelo. Com as condições forçadas, são utilizados os valores obtidos no modelo unidimensional. No caso da análise do escoamento, por exemplo, correspondem a fluxos de entrada não perturbados. Por fim, as condições cíclicas consistem na utilização dos valores determinados externamente à área do modelo. Descrevem situações em que as estruturas das áreas interna e externa são parecidas e próximas, sendo que os perfis verticais das variáveis se alteram pela interacção com os elementos do modelo de forma contínua.

## 6.1.2 O modelo atmosférico

Para descrever a evolução temporal e espacial do campo de vento são utilizadas as equações de *Navier-Stokes* na forma tridimensional, não hidrostáticas, utilizando a aproximação de *Boussinesq*<sup>22</sup>, pela qual a massa volumica do ar  $\rho$  é substituída, na equação relativa à componente vertical, por uma parcela adicional que inclui os movimentos verticais de origem térmica. As equações podem ser escritas na forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + K_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + K_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + K_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f(v - v_g) - S_u(x, y, z);$$

[ 6.3 ]

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + K_m \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + K_m \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + K_m \left( \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f(v - v_g) - S_v(x, y, z);$$

[ 6.4 ]

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + K_m \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + K_m \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + K_m \left( \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w(x, y, z);$$

[ 6.5 ]

Onde:

<sup>22</sup> Baseia-se na suposição de que a variação da densidade não é importante para a dinâmica excepto quando a densidade está associada com a gravidade. Isto é, a densidade é considerada constante em todos os termos das equações governantes excepto no termo de flutuabilidade das parcelas do fluido.

- $f = 10^4 \text{sec}^{-1}$ . Parâmetro de Coriolis;
- $p$  = pressão local;
- $\theta$  = temperatura potencial;
- $\theta_{ref}$  = temperatura média calculada para todas as células, excluindo as ocupadas por edifícios;
- $g$  = aceleração de gravidade;
- $K_m$  = coeficiente de troca turbulenta;
- $S_{u(i)} = \overline{\partial p' / \partial x_i} = c_{d,f} LAD(z) W u_i$ . Parâmetro que descreve o arrastamento devido à presença de vegetação, onde  $c_{d,f}$  é o coeficiente de arrastamento dos elementos vegetais,  $LAD(z)$  é a densidade dos mesmos e  $W$  é a velocidade principal do vento.

Devido a introdução da aproximação supracitada, e de forma a verificar a conservação do fluxo de massa é também necessário satisfazer, a cada intervalo de tempo, a seguinte equação:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

[ 6.6 ]

O primeiro passo para definir o campo de vento consiste no cálculo das componentes da velocidade do vento geostrófico para o modelo unidimensional, com base no comprimento de rugosidade e na velocidade de referência à cota de 10m definidos pelo utilizador, utilizando as seguintes expressões derivadas da lei logarítmica:

$$u_g = U_{10} \ln\left(\frac{\delta}{z_0}\right) \ln\left(\frac{10}{z_0}\right)^{-1} \sin \Pi;$$

[ 6.7 ]

$$v_g = U_{10} \ln\left(\frac{\delta}{z_0}\right) \ln\left(\frac{10}{z_0}\right)^{-1} \cos \Pi;$$

[ 6.8 ]

Sendo  $\Pi$  o ângulo formado pelo vento principal com a direcção norte. As mesmas expressões são utilizadas para calcular as componentes da velocidade do vento do modelo unidimensional para as cotas  $z$ . Numa primeira fase, o campo de vento do modelo unidimensional é implementado em todos os pontos da grelha do modelo tridimensional, incluindo as superfícies dos obstáculos. É realizado um primeiro cálculo do campo de vento incluindo a rugosidade das superfícies incluídas, bem como a densidade dos elementos porosos. Seguem-se mais duas fases de cálculo: na primeira as componentes do escoamento nas superfícies dos obstáculos são reduzidas de 50%, na última são igualadas a zero de forma a satisfazer a condição de não escorregamento superficial. Deste modo, o gradiente de perturbação devido à presença dos obstáculos acumula-se lentamente, garantindo a estabilidade do processo. Se assim não fosse, existiria uma diferença demasiado grande entre a distribuição do fluxo determinada em cálculos consecutivos, impossibilitando a convergência do método.

## 6.2 O modelo *ENVI-met*

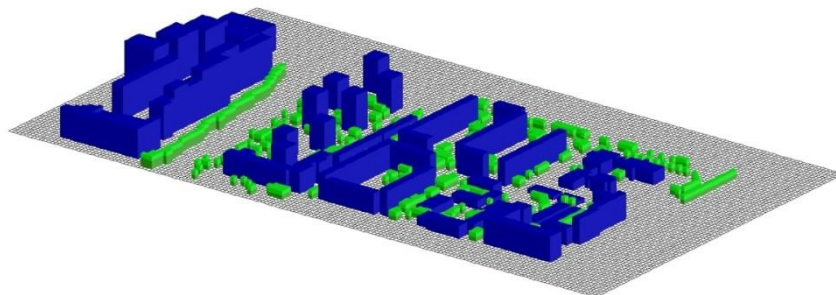
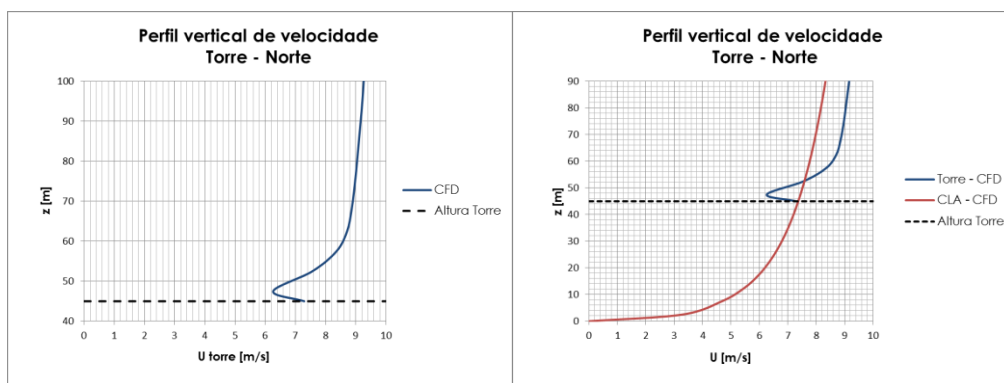


Fig. 6-3 Modelo tridimensional da área de estudo, obtido pelo *ENVI-met*.

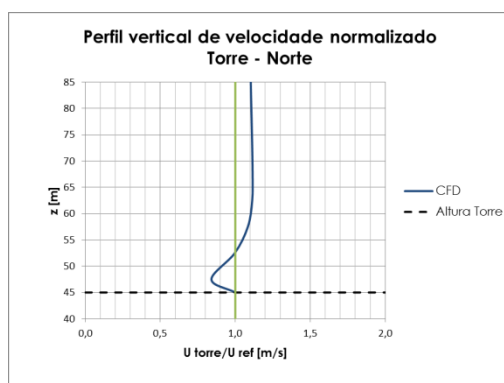
A Figura 6.3 mostra o modelo tridimensional da área de estudo construído com o *software* de simulação *ENVI-met*. A malha é constituída coma resolução de  $159 \times 89 \times 30$  células cúbicas. Cada célula tem dimensões  $5 \times 5 \times 5m$ , excepto as que se encontram ao nível do solo, cuja altura é de  $2,5m$ . O modelo tridimensional estende-se até a uma cota de  $150m$  e a sua área é de cerca  $3,5km^2$ , igual a área real. De forma a reduzir o custo computacional, optou-se por utilizar uma configuração telescópica da malha vertical, com incremento de 10% da altura das células a partir de uma cota de  $600m$ . Para evitar que as aproximações de cálculo na fronteira do modelo dessem origem a erros nos valores calculados na área de interesse, decidiu-se utilizar uma área externa de nidificação até a uma distância correspondente a três células.

## 6.2.1 Caso 1: Torre com direcção do vento Norte

Como se observa na *figura 6.4*, a forma dos perfis verticais de velocidade determinados através do *CFD* apresenta uma curvatura mais acentuada até uma cota de cerca 65m. Introduzindo o perfil de velocidade do fluxo na entrada, é possível identificar as zonas de aceleração. A área compreendida entre as duas curvas, com o perfil de velocidade do ponto em análise em avanço relativamente ao perfil da CLA, corresponde a uma zona de aceleração. O ponto de intersecção entre as duas curvas define a cota a partir da qual se realiza a aceleração do escoamento. Este ponto corresponde a uma cota de cerca 53m. O factor de aceleração máximo é igual a 1,12 e é registrado a uma cota de 65m, ou seja 20m acima da cobertura (*Fig. 6.5*).



**Fig. 6-4** (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 1 obtido pelo *ENVI-met*. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 1 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo *ENVI-met*.



**Fig. 6-5** Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 1 obtido pelo *ENVI-met*.



## 6.2.2 Caso 2: Escola com direcção do vento Norte

Como se observa na *figura 6.6*, a forma do perfil vertical de velocidade determinado através do ensaio e do *CFD* apresenta uma curvatura mais acentuada até uma cota de cerca 45m. O gráfico de *figura 6.6 (direita)* mostra que o ponto de intersecção entre o perfil de velocidade do ponto em análise e o perfil do fluxo em entrada corresponde a uma cota de cerca 32m, ou seja a uma altura de cerca 20m acima da cobertura. O factor de aceleração máximo é igual a 1,06 e corresponde a uma cota de 35,5m acima da cobertura.

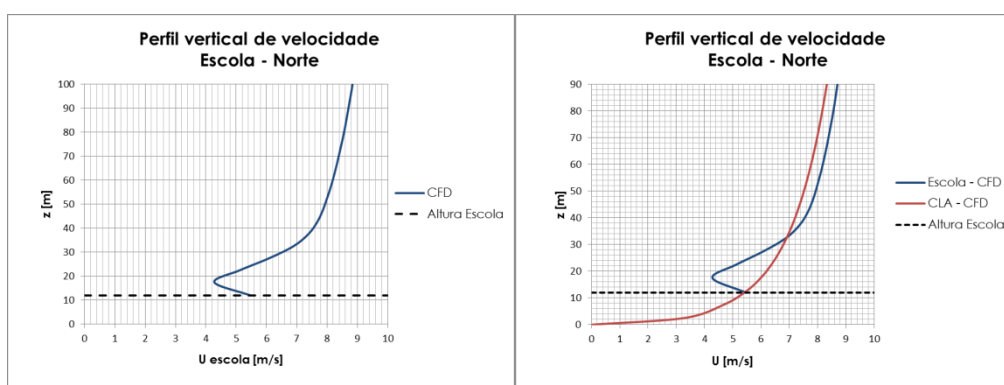


Fig. 6-6 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 2 obtido pelo ENVI-met. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 2 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ENVI-met.

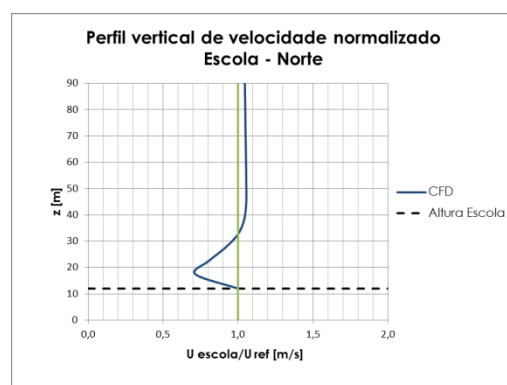


Fig. 6-7 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 2 obtido pelo ENVI-met.

### 6.2.3 Caso 3: Torre com direcção do vento Sul

Como se observa na *figura 6.8*, a forma do perfil vertical de velocidade determinados através do *CFD* apresenta uma curvatura mais acentuada até uma cota de cerca 65m. O gráfico de *figura 6.8 (direita)* mostra que o ponto de intersecção entre o perfil de velocidade do ponto em análise e o perfil do fluxo em entrada corresponde a uma cota de cerca 53m (8m acima da cobertura), analogamente ao Caso 1. O valor máximo do factor de aceleração é igual a 1,12, correspondendo a uma cota de cerca 63m (18m acima da cobertura) (*Fig. 6.9*).

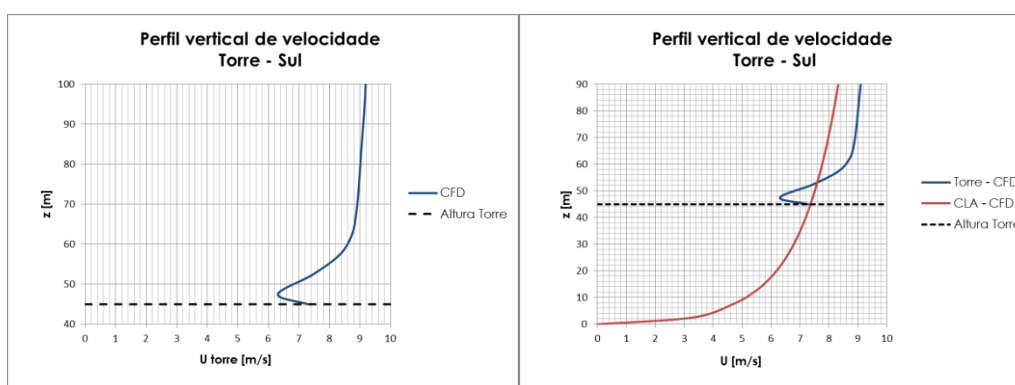


Fig. 6-8 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 3 obtido pelo ENVI-met. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 3 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ENVI-met.

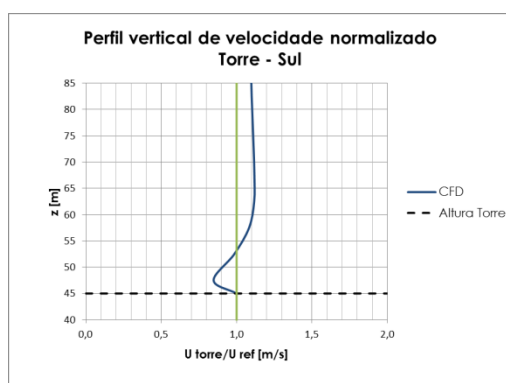


Fig. 6-9 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 3 obtido pelo ENVI-met.

## 6.2.4 Caso 4: Escola com direcção do vento Sul

Como se observa na *figura 6.10*, a forma do perfil vertical de velocidade determinado através do ensaio e do *CFD* apresenta uma curvatura mais acentuada até uma cota de cerca 50m. O gráfico de *figura 6.10 (direita)* mostra que o ponto que define o início da área de aceleração corresponde à cota de cerca 35m. O valor máximo do factor de aceleração é igual a 1,05 e é registado a uma cota de 52,5m, ou seja 40m acima da cobertura (*Fig. 6.11*).

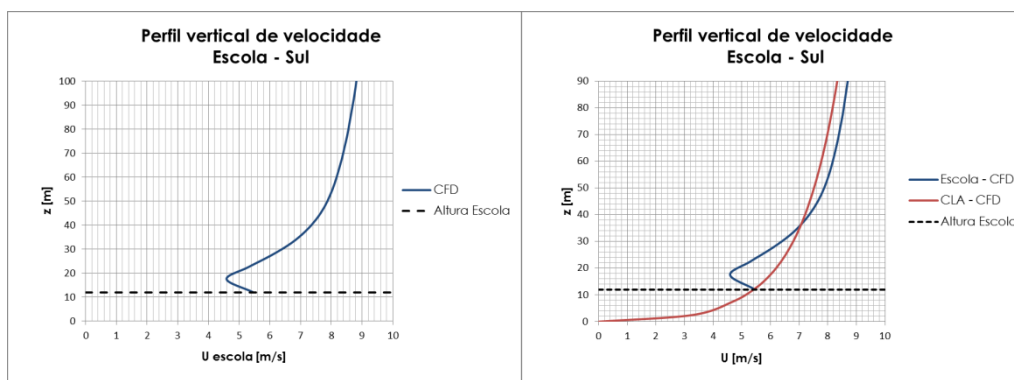


Fig. 6-10 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 4 obtido pelo ENVI-met. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 4 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ENVI-met.

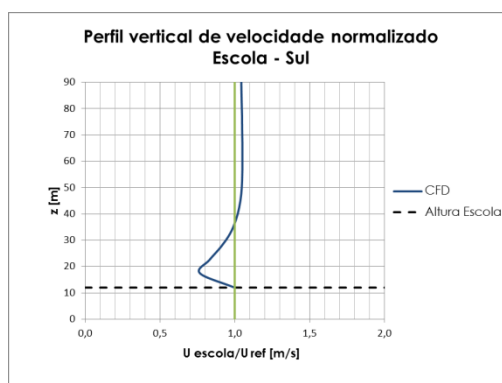


Fig. 6-11 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 4 obtido pelo ENVI-met.

## 7 Túnel de Vento

---

### 7.1 O Túnel Aerodinâmico de Camada Limite do LNEC

Um túnel aerodinâmico é uma instalação geradora de uma corrente de ar, destinada à simulação experimental de certos tipos de escoamentos reais. O LNEC possui dois túneis situados nas suas instalações: um mais antigo projectado nos anos 60 do século passado, e outro mais recente e de maiores dimensões, utilizado para o caso de estudo. Este é um túnel de aspiração e descarga atmosférica e câmara de ensaios fechada. A sua secção é de  $3 \times 2,1 \text{ m}^2$  e o seu comprimento de  $10 \text{ m}$ . A velocidade do escoamento na câmara de ensaios é regulável em contínuo, em escalões de cerca  $3,5 \text{ m/s}$ , que correspondem à entrada em funcionamento dos seis ventiladores, que têm uma potência de  $11 \text{ kW}$  cada, instalados de forma simétrica, a jusante da câmara de pleno, e com possibilidade de regulação fina de dois deles através de um variador de frequência.



Fig. 7-1 (Esquerda) Vista exterior da câmara de pleno do túnel aerodinâmico do LNEC. (Direita) Vista interior da abertura de entrada do ar exterior do túnel aerodinâmico do LNEC.



Fig. 7-2 Vista interior da câmara de pleno do túnel aerodinâmico do LNEC.

## 7.2 A simulação da CLA

Entre os diversos métodos de simulação da Camada Limite Atmosférica existentes, centrou-se especial atenção no método de *Irwin* (Irwin, 1981). A camada limite atmosférica real é simulada através de uma camada limite que se desenvolve sobre uma superfície plana com determinada rugosidade. Aqui a rugosidade superficial tem efeito semelhante à orografia do terreno ou às edificações estabelecendo, deste modo, um perfil de velocidades médias com determinadas características. A metodologia consiste em dispor a montante do modelo físico elementos passivos (pináculos), de modo a provocarem simultaneamente um escoamento preferencial pela parte superior do túnel (daí a forma triangular desses elementos) e fenómenos de turbulência. Ao longo do túnel são ainda dispostos elementos de rugosidade cúbicos, na direcção transversal e longitudinal do chão do túnel, cuja função é promover rugosidade ao escoamento, proporcionando a redução da quantidade de movimento apropriada para gerar a CL pretendida (Fig. 7.3).

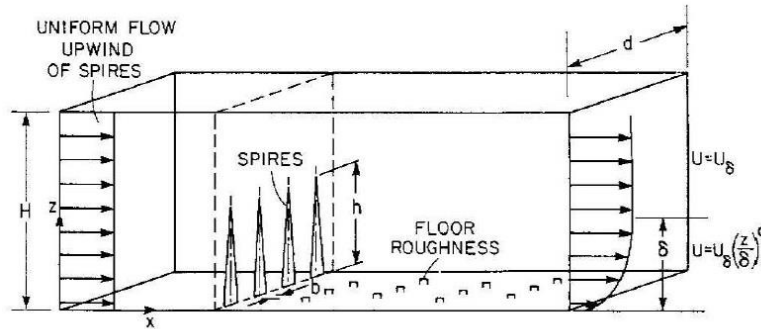


Fig. 7-3 Elementos de separação para a simulação da CLA (Irwin, 1981).

A expressão para o cálculo da área frontal dos pináculos, necessária para dar origem a uma camada limite com os valores do expoente  $\alpha$  e espessura  $\delta$  requeridos, é obtida a partir do balanço da quantidade de movimento na CL e a perda de carga ao longo do túnel com a resistência dos pináculos e do solo. Introduzindo o coeficiente de resistência dos pináculos e considerando a relação entre a própria altura e a espessura da CLA, são deduzidas as expressões que definem a base  $b$  e a altura  $h$  de tais elementos:

$$h = 1,39 \delta / (1 + \alpha/2); \quad [7.1]$$

$$b/h = 0,5[\psi(h/\delta)/(1 + \psi)](1 + \alpha/2); \quad [7.2]$$

onde:

$$\psi = \beta\{[2/(1 + 2\alpha)] + \beta - [1,13\alpha/(1 + \alpha)(1 + \alpha/2)]\}/(1 - \beta)^2; \quad [7.3]$$

$$\beta = (\delta/H)\alpha/(1 + \alpha).$$

[ 7.4 ]

Os pináculos deverão ser posicionados a uma distância do modelo físico igual a  $6h$ , e a uma distância entre os próprios eixos igual a  $h/2$ , de forma a garantir a uniformidade transversal da CL. Aumentando a largura da base dos pináculos numa proporção  $6/x$ , a camada limite será obtida a uma distância  $x \cdot h$ , sendo aconselhável a adopção de um  $x$  não inferior a 4,5.

Para simular o arrastamento originado pela rugosidade do solo, utilizam-se elementos cúbicos, cuja dimensão característica  $k$  é calculada através da seguinte fórmula empírica:

$$k/\delta = \exp\left\{(2/3)\ln(D/\delta) - 0,1161\left[(2/C_f) + 2,05\right]^{1/2}\right\}$$

[ 7.5 ]

onde  $D$  é a distância entre os elementos de rugosidade e o coeficiente de arrastamento  $C_f$  é igual a:

$$C_f = 0,136[\alpha/(1 + \alpha)]^2$$

[ 7.6 ]

A expressão acima é válida se resulta:

$$30 < \delta D^2/k^3 < 2000$$

[ 7.7 ]

## 7.3 A medição dos perfis de vento em altura

Existem muitas técnicas de medição para determinar os fluxos de ar (direcções, velocidades, intensidades de turbulência, etc.), em túneis aerodinâmicos. Uma vez que a avaliação do potencial eólico assenta essencialmente na determinação dos perfis verticais de velocidades, apresentar-se-á a técnica dos perfis de vento em altura, com as velocidades medidas com tubos de *Pitot-Prandtl*. Ao contrário de outras técnicas, como as anemotrias térmicas, ou os anemómetros Laser-Doppler, que exigem meios mais dispendiosos e são mais difíceis de operar, os tubos de *Pitot* são apontados como mais robustos, fáceis de manejar e económicos. A principal limitação consiste nos erros gerados em medições realizadas por detrás dos obstáculos, já que é muito difícil procurar a direcção mais correcta, sendo usada apenas para determinar velocidades horizontais. Por outro lado, é uma técnica desaconselhada para simular ventos muito fracos ou com elevados níveis de turbulência.

O tubo de *Pitot-Prandtl* é dotado de uma haste de inserção que faz com a outra extremidade um ângulo de  $90^\circ$ . Esta haste é constituída por dois tubos concêntricos isolados entre si que fazem a ligação, num deles, de um conjunto de orifícios tangenciais e, no outro, do orifício

frontal com a extremidade traseira do instrumento (Fig.7.4). A pressão estática é captada pelos orifícios tangenciais do tubo e a pressão total é adquirida pelo orifício frontal sempre que a velocidade do escoamento de um fluido é bruscamente interrompida até a sua estagnação, na qual se admite como hipótese a desaceleração isentrópica. Os ensaios devem ser realizados de modo a que o escoamento em torno do próprio tubo seja pouco perturbado por este, de modo a não influenciar a medição da pressão estática. Também se deve posicionar o tubo de forma que seja alinhado com as linhas de corrente do escoamento e bem centrado relativamente as paredes laterais do túnel, de forma a não ser afectado por um escoamento assimétrico.

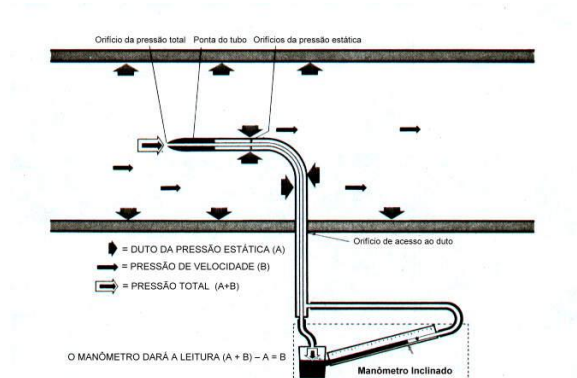


Fig. 7-4 Representação esquemática do tubo de Pitot-Prandtl (Skilltech).

Para obter as velocidades do escoamento do fluxo de ar a várias alturas acima do modelo físico é necessário medir as pressões num, ou vários tubos de Pitot-Prandtl e transformar os valores obtidos de pressão em velocidades, através da aplicação da equação de Bernoulli, baseada na conservação da energia ao longo de uma linha de fluxo, para um fluido invíscido, incompressível e para um escoamento estacionário:

$$\frac{P_e}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} + z = Cte.$$

[ 7.8 ]

sendo:

- $P_e/\gamma$  = energia associada à pressão estática. Onde  $P_e$  é a pressão estática e  $\gamma$  é o peso específico;
- $U^2/2g$  = energia cinética. Onde  $U$  é a velocidade do fluxo e  $g$  é a aceleração de gravidade;
- $z$  = energia potencial (pressão hidrostática);
- $Cte.$  = Pressão total ou de estagnação.

Para um fluxo à mesma altura, os únicos termos que se modificam na equação de Bernoulli são a energia cinética e a energia associada à pressão estática. Resulta que a pressão total  $P_t$  excede a pressão estática de uma quantidade que é a pressão dinâmica  $P_d$ . É fácil verificar que:

$$P_t = P_s + \frac{1}{2}\rho U^2;$$

[ 7.9 ]

$$P_t - P_e = P_d; \quad [7.10]$$

$$P_d = \frac{1}{2} \rho U^2. \quad [7.11]$$

A velocidade do escoamento é enfim calculada como:

$$U = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} \quad [7.12]$$

Os tubos de *Pitot-Prandtl* são ligados através de tubos de plástico às tomadas de pressão de micromanómetros do tipo *Betz*, que permitem um erro absoluto de leitura inferior a 0,05mm de coluna de água.

## 7.4 O modelo físico

A maqueta de Telheiras foi elaborada a partir de uma planta na escala 1: 500 e das alturas dos prédios extrapoladas dos dados fornecidos pela Câmara Municipal de Lisboa, no âmbito de um estudo precedente de climatologia urbana (Lopes, 2003). A base da maqueta foi construída com esferovite numa inclinação que simula o declive real (cerca de 3°). Os edifícios foram construídos com blocos em madeira que se encaixam na maqueta. Uma régua que simula o aterro e a sobrelevação do Eixo Norte-Sul foi feita com o mesmo material (*Fig. 7.5*).



**Fig. 7-5** Imagem do modelo físico da área de estudo.

Importa salientar que na parte oeste do modelo, além do Eixo Norte-Sul, foi incluída parte de um conjunto de edifícios existentes não mencionado no parágrafo anterior, uma vez que é possível que esta área induza modificações no campo de vento na área de estudo. Os edifícios



em questão têm alturas até aos 55m. A banda paralela ao Eixo Norte-Sul constitui uma barreira que delimita um corredor de ventilação privilegiado quando o vento sopra de norte.

## 7.5 Definição da CLA para a área de estudo

Para simular a Camada Limite Atmosférica utilizou-se um conjunto de elementos passivos constituídos por pináculos e cubos dimensionados através do método de *Irwin* em função de um expoente  $\alpha = 0,23$ , típico de um ambiente suburbano (Castanho, 2012).

O dimensionamento dos pináculos foi realizado fixando o valor mínimo da incógnita  $x = 4,5$  contida na expressão do cálculo da distância de formação da camada limite com comportamento transversal uniforme, pois pretendeu-se garantir que existisse espaço suficiente para a camada limite estabilizar antes de chegar ao modelo físico. Sucessivamente procedeu-se a definição da altura da CLA ( $\delta$ ), através de uma análise prévia dos resultados obtidos para diferentes valores de  $\delta$ , em termos de dimensões dos pináculos ( $h, b$ ), do próprio distanciamento ( $d$ ) e da distância de formação da CLA estável ( $x \cdot h$ ). Tendo em conta das dimensões do túnel aerodinâmico e da escala do modelo físico, resultou que a altura mais viável da camada limite corresponde a  $\delta = 1$ . Resulta que a CLA atinge metade da altura do túnel de vento e cerca de 82% da altura dos elementos passivos. A distância de formação da camada limite estável relativamente aos pináculos é de cerca 5,5m. Apresentam-se na tabela seguinte os resultados obtidos:

Altura do pináculo – h (m)	1,220
Separação dos eixos dos pináculos – d (m)	0,610
Largura da base da superfície de separação do pináculo – e (m)	0,305
Largura da base do pináculo – b (m)	0,240
Número de pináculos do modelo	3

**Tab. 7-1 Dados definitivos de dimensionamento dos pináculos (Castanho, 2012).**

O dimensionamento dos elementos cúbicos foi realizado mediante um cálculo iterativo da dimensão da aresta  $k$ . Entre as várias soluções validas, a escolha da dimensão dos cubos e do próprio distanciamento foi feita tendo em conta das dimensões do túnel aerodinâmico. Escolheu-se um cubo de aresta com 10cm, obtendo-se uma disposição transversal de 7 linhas de 8 cubos, intercalada com 6 linhas de 7 cubos, dispostos de uma forma desfasada, com uma distância entre eixos de 40cm, correspondendo a um espaçamento entre faces dos cubos adjacentes de 30cm. Esta disposição resulta num total de 98 elementos de rugosidade (Fig. 7.6).



Fig. 7-6 Elementos passivos de rugosidade e turbulência na câmara do túnel de vento.

## 7.6 Metodologia de ensaio

Uma vez definida a CLA para o caso de estudo, procedeu-se a realização dos ensaios, seguindo passos seguintes:

- 1 Preparou-se o túnel de vento, posicionando os elementos passivos de rugosidade e de turbulência como descrito no parágrafo anterior. Posicionou-se também o modelo físico, orientado conforme a direcção do vento que se queria estudar (*Fig. 7.5*).
- 2 Posicionou-se um tubo de *Pitot-Prandtl* no tecto do túnel, para medir a pressão total e estática da camada de ar não perturbada (*Fig.7.7*).
- 3 Posicionou-se outro tubo de *Pitot-Prandtl* a montante do modelo físico, a uma altura de 12cm (equivalente á cota de 60m), para medir a pressão total num ponto do escoamento dentro da CLA ainda não influenciado pela presença dos edifícios (*Fig.7.7*).
- 4 Definiram-se os pontos onde se pretendia traçar os perfis verticais, e utilizou-se um terceiro tubo de *Pitot* para medir a pressão total nestes pontos, variando a cota do tubo a cada medição (*Fig.7.8*).
- 5 No início de cada medição, accionavam-se os ventiladores 2, 4 e 6, dando origem a uma velocidade de escoamento de cerca 10,5m/s (*Fig.7.8*).
- 6 Uma vez estabilizado o escoamento, anotavam-se as médias de valores de pressão com frequência de 1 segundo para um intervalo de cerca um minuto.
- 7 A partir dos valores de pressão total e de pressão estática, calculava-se a pressão dinâmica no ponto de referência e num ponto do modelo físico, logo as velocidades correspondentes.

Sendo o objectivo principal do caso de estudo a avaliação da influência dos edifícios sobre o escoamento numa óptica de aproveitamento da energia eólica, a normalização dos resultados das velocidades medidas na área de estudo relativamente às respectivas velocidades de referência permite quantificar em termos percentuais os eventuais efeitos de aceleração. Daqui resulta a exigência de dispor um tubo a montante do modelo físico.



**Fig. 7-7** (Esquerda) Tubo de Pitot-Prandlt no tecto do túnel de vento. (Direita) Tubo de Pitot-Prandlt de referência.



**Fig. 7-8** (Esquerda) Tubo de Pitot-Prandlt no modelo físico. (Direita) Ventiladores do túnel de vento.

## 7.6.1 Perfil vertical de velocidade da CLA

O perfil vertical de velocidade da CLA é traçado utilizando a Lei de Potência, a partir do valor de velocidade medido no ponto de referência, a uma altura de  $12\text{cm}$ , que em escala corresponde a uma cota de  $60\text{m}$ . Sendo um dado relativo ao escoamento a entrada do modelo, o seu valor deve manter-se constante ao longo das várias medições, pelo que o seu cálculo foi realizado com base nos valores médios de pressão total e pressão estática resultantes de todas as medições. Os resultados são apresentados na seguinte tabela:

$Pt_{ref(60)} [Pa]$	$Pe [Pa]$	$Pd_{ref(60)} [Pa]$	$U_{ref(60)} [m/s]$
23,01	-1,77	24,78	6,36

Tab. 7-2 Valores médios da pressão total, estática e dinâmica e da velocidade, no ponto de referência obtidos nos ensaios.

Aplicando a Lei de Potência com o expoente  $\alpha = 0,23$ , traça-se o perfil vertical de velocidade.

Uma primeira validação dos resultados obtidos em *CFD* pode ser feita comparando o perfil vertical de velocidade da CLA obtida nos ensaios, com o perfil vertical de velocidade do fluxo a entrada no modelo *ENVI-met*.

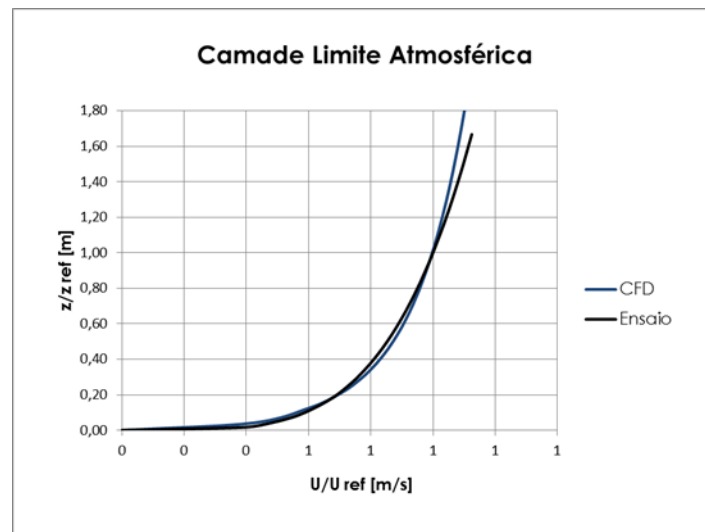


Fig. 7-9 Comparação dos perfis verticais de velocidade do fluxo a entrada, obtidos pelo ensaio e pelo CFD.

Como se pode ver na *figura 7.9*, a comparação dos perfis verticais dos fluxos a entrada produz resultados satisfatórios, uma vez que as curvas apresentam a mesma forma. Analiticamente, é possível verificar tal semelhança determinando a equação da curva obtida em *CFD*, isto é:

$$z = 0,0096U_z^{4,3059}$$

[ 7.13 ]

Resolvendo esta expressão para a velocidade, obtém-se um valor do expoente  $\alpha = 0,23$ , pelo que os resultados obtidos resultam verificados.

## 7.6.2 Caso 1: Torre com direcção do vento Norte

Para traçar o perfil vertical da velocidade do vento na torre com direcção do vento Norte, foram realizadas medições em 12 cotas diferentes. Os resultados em termos de velocidade do vento e velocidade do vento normalizada são reportados de seguida:

$z$ [m]	46,5	47,5	49,0	50,5	53	55	57,5	60,0	65,0	70,0	76,0	82,0
$U_{torre}$ [ $\frac{m}{s}$ ]	4,14	4,36	5,43	5,75	6,15	6,32	6,55	6,66	7,26	7,29	7,34	7,54
$U_{torre}/U_{ref}$ [-]	0,69	0,72	0,89	0,94	0,99	1,01	1,04	1,05	1,12	1,11	1,09	1,10

Tab. 7-3 Resultados do ensaio na Torre com direcção do vento Norte.

Nos pontos de medição mais próximos da cobertura da torre seriam de esperar valores de pressão negativos, correspondentes à bolha de recirculação que tipicamente se forma devido a separação do escoamento. Na realidade, os resultados obtidos resultam positivos já a partir da cota mais baixa, correspondente a 1,5m acima da cobertura, pelo que se supõe que a bolha de recirculação tenha uma altura menor. Dado que o tubo de *Pitot* utilizado tinha um diâmetro de cerca 5mm, não foi possível realizar medições a cotas mais próximas da superfície para determinar a altura efectiva desta região. Utilizando o modelo de Wilson (parágrafo 3.6.1) para determinar as dimensões da bolha de recirculação de forma analítica, resulta que esta atinge uma altura máxima igual a  $H_r = 5,76m$  a uma distância do bordo exposto ao escoamento de 13,10m, sendo que a largura e a profundidade são ambas iguais a 20m . Esta discordância entre os resultados é possivelmente explicada pelo facto de a expressão analítica não ter em conta a interacção do escoamento com os edifícios mais próximos. De facto, a montante da torre em exame na direcção do escoamento, mais precisamente a uma distância de cerca 50m existe uma torre com altura de 38m. É possível que se estabeleça um efeito pirâmide, ou seja que o escoamento se venha separar ao embater na primeira torre, tendendo a se recolhar em correspondência da torre a jusante.

Como se observa nos gráficos de *figura 7.10*, o perfil vertical de velocidade determinado através do ensaio apresenta uma forma bastante semelhante à forma do perfil obtido pelo *CFD*. A sua curvatura é mais acentuada até uma cota de cerca 65m. Também os resultados relativos ao ponto de intersecção entre o perfil de velocidade do ponto em análise e o perfil do fluxo na entrada correspondem, sendo igual a uma cota de cerca 53m em ambos os casos. O factor de aceleração máximo é igual a 1,12 e é registrado a uma cota de 65m, ou seja 20m acima da cobertura, confirmando mais uma vez, os resultados obtidos pelo *CFD* (*Fig. 7.11*). A comparação dos perfis de velocidades normalizados obtidos com os dois métodos de *figura 7.12* mostra a forte semelhança dos resultados.

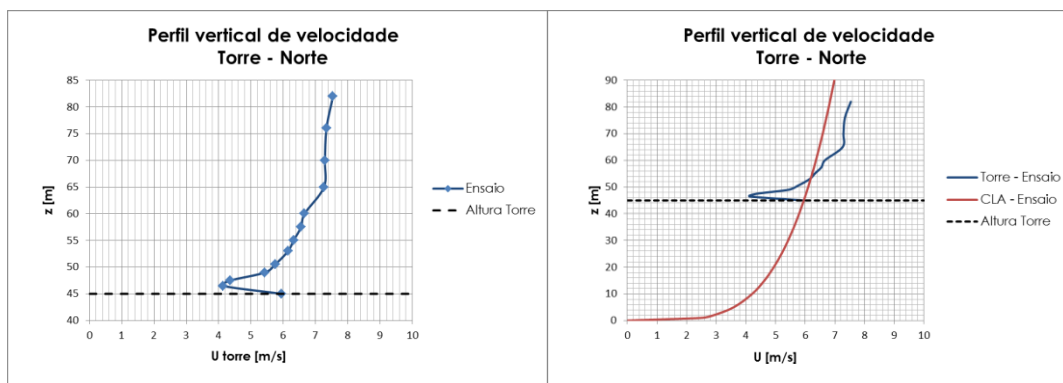


Fig. 7-10 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 1 obtido pelo ensaio. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 1 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ensaio.

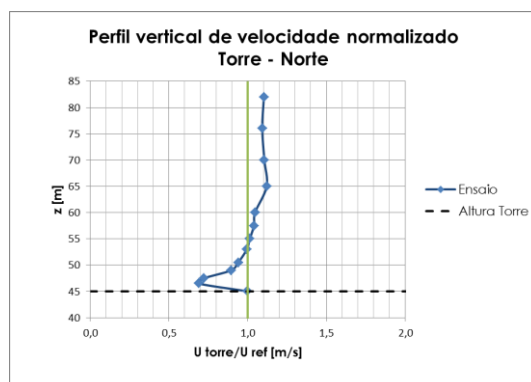


Fig. 7-11 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 1 obtido pelo ensaio.

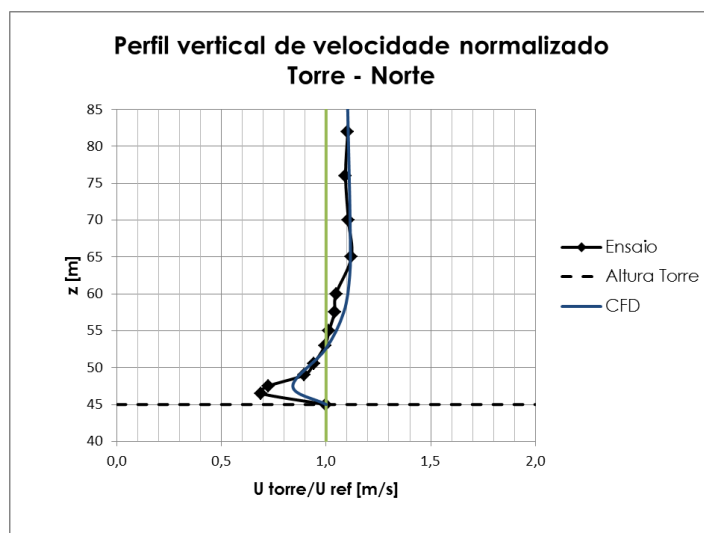


Fig. 7-12 Comparação entre os perfis verticais de velocidade normalizados para o Caso 1 obtidos pelo ensaio e pelo CFD.

### 7.6.3 Caso 2: Escola com direcção do vento Norte

Para traçar o perfil vertical da velocidade do vento na escola com direcção do vento Norte, foram realizadas medições em 17 cotas diferentes. Os resultados em termos de velocidade do vento e velocidade do vento normalizada são reportados de seguida:

$z$ [m]	13,75	15,0	16,5	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5
$U_{escola}$ [ $\frac{m}{s}$ ]	1,24	2,08	3,07	3,22	3,21	3,96	4,41	5,03	5,20	6,07	6,28	6,40	6,77	7,25	7,03	7,43	7,48
$\frac{U_{escola}}{U_{ref}}$ [-]	0,27	0,45	0,65	0,67	0,65	0,78	0,85	0,95	0,96	1,10	1,12	1,12	1,15	1,20	1,14	1,18	1,17

Tab. 7-4 Resultados do ensaio na Escola com direcção do vento Norte.

Também neste caso não foram registados valores negativos de pressão, pelo que é de esperar que a bolha de recirculação tenha uma altura inferior à cota mínima de medição, correspondente 1,75m acima da cobertura. Analogamente ao caso anterior, a montante do edifício em exame existe outro pavilhão da escola com a mesma altura, distante cerca 35m.

Como se observa nos gráficos de *figura 7.12*, o perfil vertical de velocidade determinado através do ensaio apresenta uma forma bastante semelhante à forma do perfil obtido pelo CFD. A sua curvatura é mais acentuada até uma cota de cerca 45m. Também os resultados relativos ao ponto de intersecção entre o perfil de velocidade do ponto em análise e o perfil do fluxo na entrada correspondem, sendo igual a uma cota de cerca 32m em ambos os casos, ou seja a uma altura de cerca 20m acima da cobertura. Enquanto na zona com valores do factor de aceleração inferiores à unidade os resultados são bastante semelhantes aos obtidos pelo CFD, na zona de aceleração o CFD tende a uma subestimação dos resultados (*Fig. 7.14 e 7.15*). De facto, o factor de aceleração máximo é igual a 1,20 no ensaio, e igual a 1,06 no CFD. Ambos são registados a uma cota de 35,5m acima da cobertura.

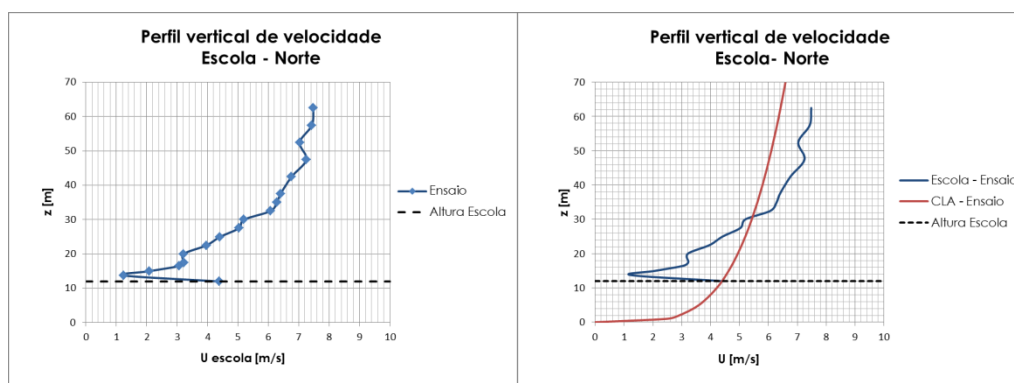


Fig. 7-13 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 2 obtido pelo ensaio. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 2 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ensaio.

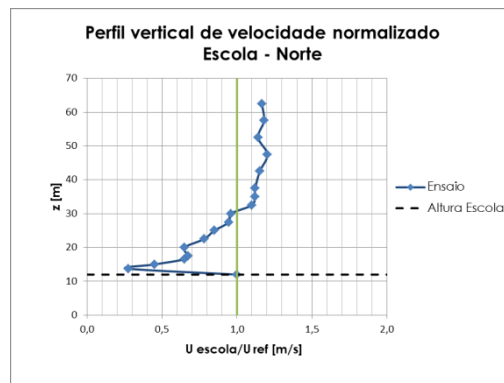


Fig. 7-14 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 2 obtido pelo ensaio.

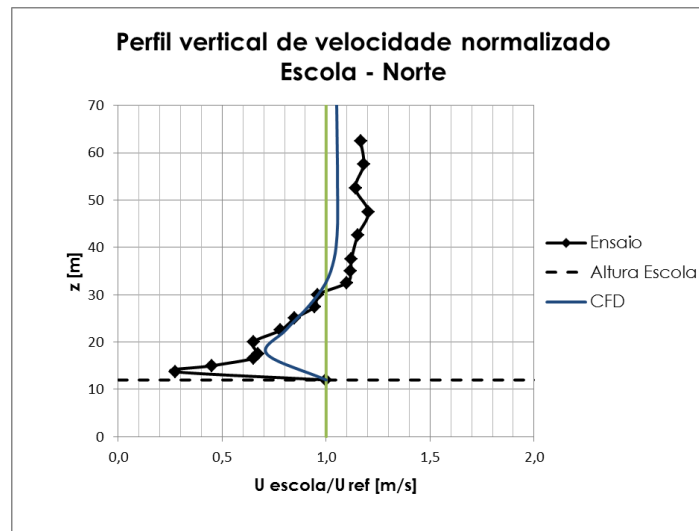


Fig. 7-15 Comparação entre os perfis verticais de velocidade normalizados para o Caso 2 obtidos pelo ensaio e pelo CFD.



### 7.6.4 Caso 3: Torre com direcção do vento Sul

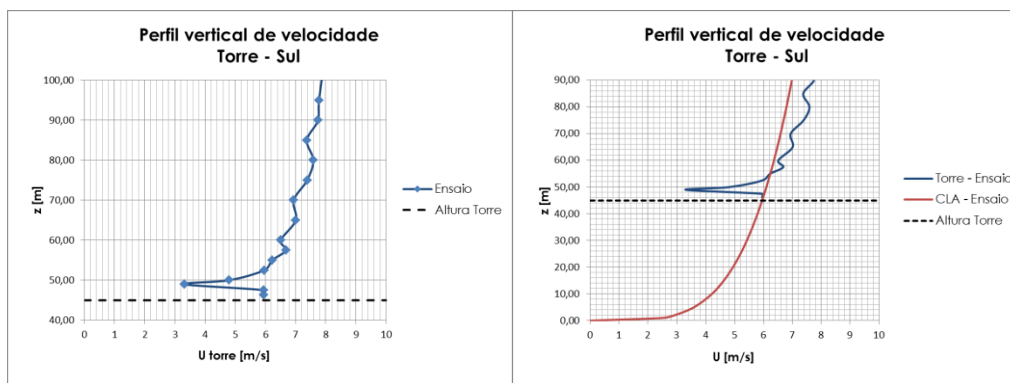
Para traçar o perfil vertical da velocidade do na torre com direcção do vento Sul, foram realizadas medições em 16 cotas diferentes. Os resultados em termos de velocidade do vento e velocidade do vento normalizada são reportados de seguida:

$z$ [m]	46,25	47,5	49,0	50,0	52,5	55,0	57,5	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	110,0
$U_{torre}$ [ $\frac{m}{s}$ ]	-	-	3,31	4,80	5,96	6,22	6,68	6,51	7,01	6,94	7,38	7,59	7,37	7,75	7,78	8,04
$\frac{U_{torre}}{U_{ref}}$ [-]	-	-	0,55	0,79	0,97	1,00	1,06	1,02	1,08	1,05	1,10	1,12	1,07	1,11	1,10	1,10

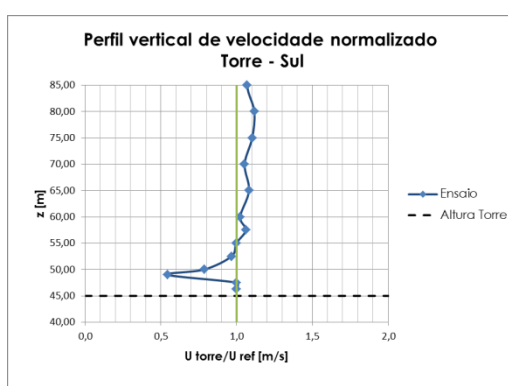
Tab. 7-5 Resultados do ensaio na Torre com direcção do vento Sul.

Contrariamente aos casos anteriores foram registrados valores negativos de pressão até a uma cota de 4m acima da cobertura, demonstrando a existência de uma bolha de recirculação de tal dimensão no ponto de medição, que corresponde ao ponto central do edifício. Se se considera que segundo o modelo analítico de *Wilson* a altura máxima se encontra a uma distância de 13,10m da borda do edifício, e que o ponto de medição foi posto a uma distância de cerca 10m, é de esperar que a altura máxima da bolha de recirculação seja próxima do valor calculado com o mesmo modelo, ou seja 5,76m. Mesmo existindo um outra torre a montante do edifício considerado, a sua altura de 33m, inferior a altura do Caso 1, explicaria a ausência do efeito pirâmide.

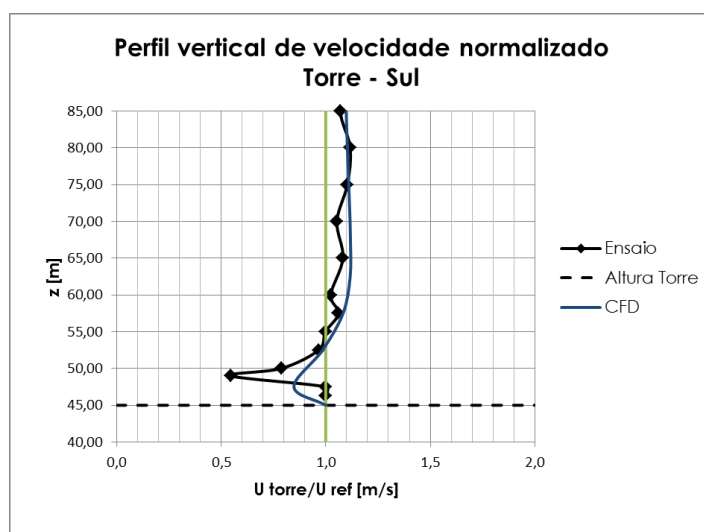
Como se observa nos gráficos de *figura 7.16*, o perfil vertical de velocidade determinado através do ensaio apresenta uma forma bastante semelhante à forma do perfil obtido pelo *CFD*. A sua curvatura é mais acentuada até uma cota de cerca 65m. Também os resultados relativos ao ponto de intersecção entre o perfil de velocidade do ponto em análise e o perfil do fluxo na entrada correspondem, sendo igual a uma cota de cerca 53m em ambos os casos, ou seja a uma altura de cerca 8m acima da cobertura. O valor máximo do factor de aceleração é igual a 1,12 de acordo com os resultados obtidos pelo *CFD*. Enquanto no caso do ensaio o factor de aceleração é máximo a uma cota de 80m (35m acima da cobertura), no caso do *CFD* corresponde a uma cota de cerca 63m (18m acima da cobertura).



**Fig. 7-16 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 3 obtido pelo ensaio. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 3 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ensaio.**



**Fig. 7-17 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 3 obtido pelo ensaio.**



**Fig. 7-18 Comparação entre os perfis verticais de velocidade normalizados para o Caso 3 obtidos pelo ensaio e pelo CFD.**

## 7.6.5 Caso 4: Escola com direcção do vento Sul

Para traçar o perfil vertical da velocidade do vento na escola com direcção do vento Sul, foram realizadas medições em 17 cotas diferentes. Os resultados em termos de velocidade do vento e velocidade do vento normalizada são reportados de seguida:

$z$ [m]	13,75	15,0	16,5	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5
$U_{escola}$ [ $\frac{m}{s}$ ]	1,55	2,23	2,95	3,25	3,60	3,86	3,82	3,79	4,12	4,60	4,68	5,12	5,50	6,01	6,32	6,58	6,36
$U_{escola}/U_{ref}$ [-]	0,34	0,48	0,62	0,68	0,73	0,76	0,74	0,71	0,76	0,83	0,83	0,90	0,94	1,00	1,02	1,05	0,99

Tab. 7-6 Resultados do ensaio na Escola com direcção do vento Sul.

Analogamente aos casos 1 e 2, não foram registrados valores negativos de pressão, pelo que supõe-se que a bolha de recirculação tenha uma altura inferior a 1,75m. Importa salientar que, a montante do edifício considerado e na direcção do escoamento, existe a célula D composta por edifícios com alturas variáveis entre os 3 e 30m, formando espaços interiores mais ou menos fechados.

Como se observa nas figuras seguintes, o perfil vertical de velocidade determinado através do ensaio apresenta uma forma bastante semelhante à forma do perfil obtido pelo CFD. A sua curvatura é mais acentuada até uma cota de cerca 50m. Os gráficos de *figura 6.23* mostram que o ponto que define o início da área de aceleração corresponde a uma cota de cerca 45m, não confirmando o valor obtidos pelo CFD (35m). Por outro lado, os valor máximo do factor de aceleração corresponde ao valor obtido pelo CFD, sendo igual a 1,05 (*Fig. 7.20 e 7.21*).

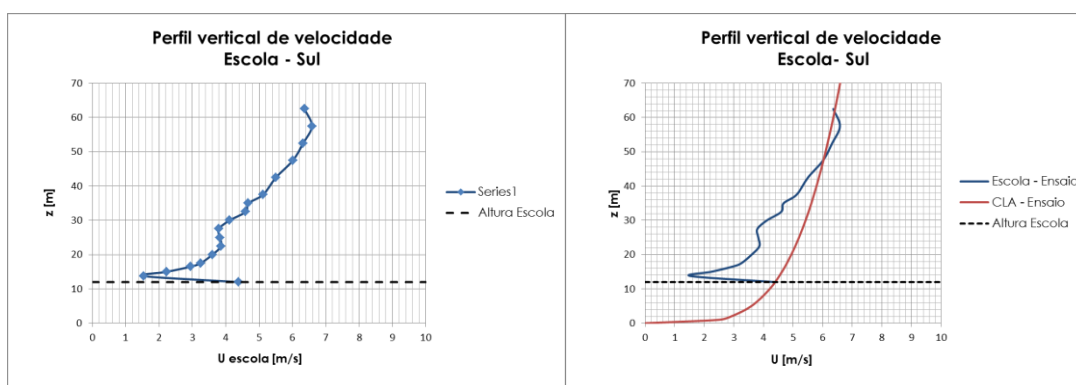


Fig. 7-19 (Esquerda) Perfil vertical de velocidade do Caso 4 obtido pelo ensaio. (Direita) Comparação entre o perfil vertical de velocidade do Caso 4 e o perfil vertical de velocidade da CLA obtidos pelo ensaio.

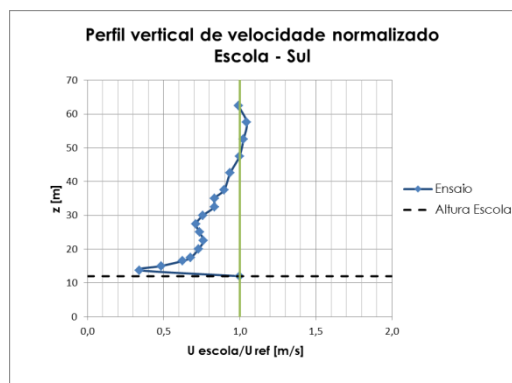


Fig. 7-20 Perfil vertical de velocidade normalizado para o Caso 4 obtido pelo ensaio.

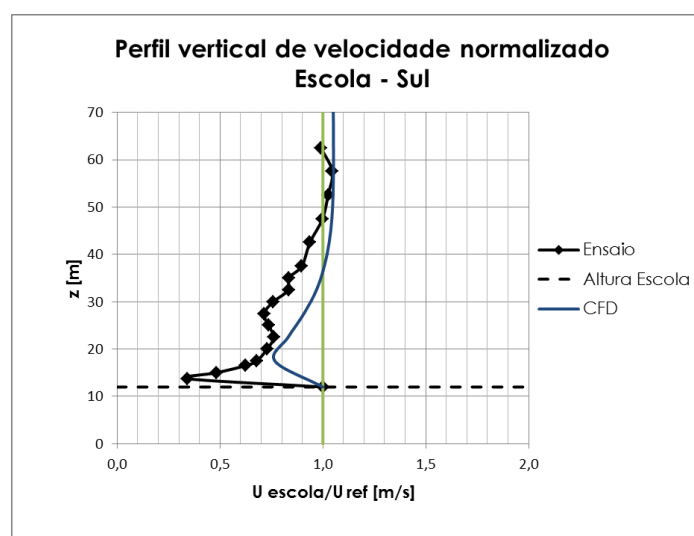
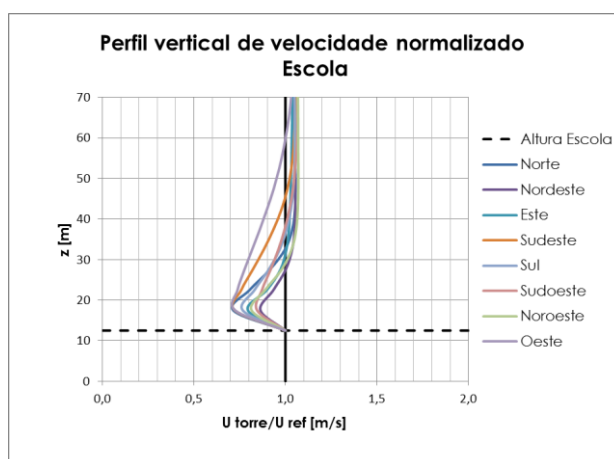


Fig. 7-21 Comparação entre os perfis verticais de velocidade normalizados para o Caso 2 obtidos pelo ensaio e pelo CFD.

## 7.7 Validação

Para a torre habitacional, a comparação dos resultados obtidos através dos ensaios e das simulações em *CFD* produziram resultados satisfatórios na definição dos perfis verticais de velocidade e velocidade normalizada quer em termos quantitativos, quer qualitativos. Em ambas as situações foi confirmada a possibilidade de conseguir factores de aceleração interessantes numa óptica de aproveitamento energético, se bem que os valores máximos sejam atingidos para cotas bastante elevadas, próximas dos 20m acima da cobertura. Por outro lado, os valores do factor de aceleração registados abaixo desta cota não são de muito inferiores ao valor máximo. Contudo, antes de poder definir a melhor altura para o posicionamento de uma turbina eólica, logo avaliar a viabilidade da sua instalação, é necessário definir os perfis verticais de velocidade relativos às outras direcções do vento.

Resultados menos concordantes, relativamente à quantificação dos efeitos de aceleração e arrastamento, foram obtidos para a Escola, possivelmente por causa da maior complexidade do processo, uma vez que o ponto estudado se encontra a uma cota mais próxima do nível do solo e o escoamento interage com um maior número de elementos de rugosidade. Seria portanto oportuno realizar um maior número de ensaios neste ponto, e em pontos do modelo com características análogas, de forma a aprofundar as razões de tal discordância e possivelmente definir factores de correcção para a análise de casos similares. Uma vez que ambas as experiências mostraram que os factores de aceleração que é possível atingir, além de ser poucos atractivos, correspondem a cotas demasiado elevadas, decidiu-se excluir este estudo.



**Fig. 7-22 Perfis verticais de vento normalizados na Escola, para todas as direcções principais.**

Observando os resultados obtidos em *CFD* no ponto “Escola” para as restantes direcções principais do vento (*Fig. 7.22*), verifica-se que os factores de aceleração são baixos em todas as situações e correspondem a cotas nunca inferiores a 20m acima da cobertura. Se se considera que em Lisboa a velocidade média anual do vento medida a uma cota de 15m é igual a 3,4m/s<sup>23</sup>, mesmo considerando apenas o valor máximo dos factores de aceleração, igual a 0,86 para a direcção Nordeste e para uma altura de 5m acima da cobertura, obter-se-ia uma velocidade de cerca 2,92m/s, inferior à velocidade de *Cut-in* de grande parte dos modelos de turbinas eólicas urbanas.

<sup>23</sup> Valor obtido considerando uma velocidade de referência à cota de 10m, resultante dos valores médios anuais observados na estação meteorológica do Aeroporto, no período 1984-1997, igual a 3,09m/s

## 8 Avaliação do potencial

---

A validação apresentada no capítulo anterior confirmou a possibilidade de obter resultados satisfatórios sem necessidade de considerar factores de correcção, relativamente aos edifícios com altura mais elevada e circundados por elementos análogos por geometria e dimensão. É de esperar que o modelo seja aplicável sem grande margem de erro também na célula B, caracterizada pela predominância de elementos em banda da mesma altura, igual a cerca 28m.

Também foi apurado o escasso potencial eólico de zonas com edifícios com altura reduzida, nomeadamente da célula C. Uma vez que a célula E apresenta edifícios com altura máxima de 15m e apresenta uma área de implantação fechada, decidiu-se excluir esta área de uma avaliação mais detalhada do potencial eólico.

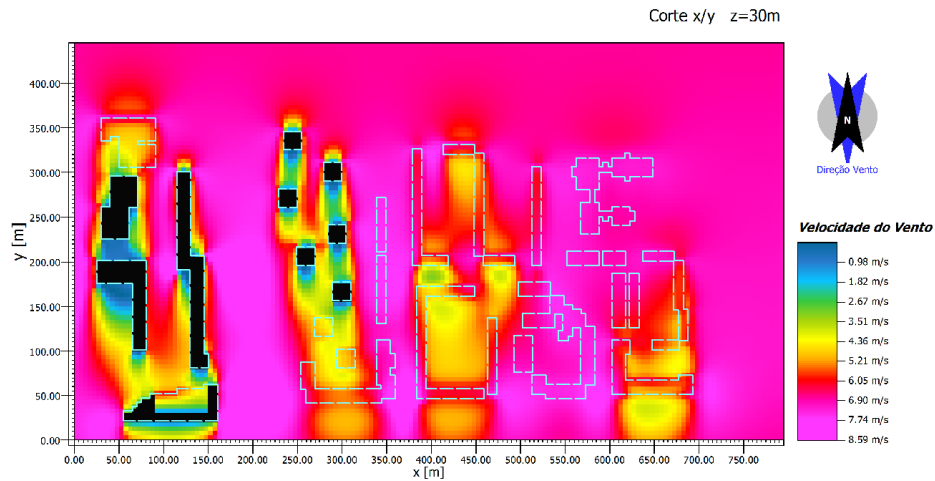
É então possível utilizar o *software* para avaliar o potencial de uma forma global nas restantes zonas da área de estudo. Para tal, reportam-se nas figuras seguintes (*Fig. 8.1 a 8.16*) os cortes horizontais dos resultados gráficos obtidos nas simulações, relativos à velocidade do vento proveniente das direcções Norte, Nordeste, Este, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste. Por cada direcção apresentam-se dois cortes. O primeiro à cota de 30m, representativa da altura média dos elementos de interesse. O segundo à cota de 35m, correspondente a uma altura acima das coberturas aceitável para a instalação de turbinas. Importa referir que as velocidades de referência, para as cotas indicadas são iguais a cerca 6,80 e 7,00m/s, respectivamente.

Os resultados mostram que Oeste é a direcção mais desfavorecida. Em ambos os cortes observa-se uma grande presença de velocidades compreendidas aproximadamente entre os 2,5 e 5,5m/s. O fluxo à entrada resulta fortemente retardado pelos edifícios localizados além do Eixo Norte-Sul, que constituem uma barreira física transversal à direcção do escoamento, com altura predominante relativamente a altura média dos elementos da área de estudo.

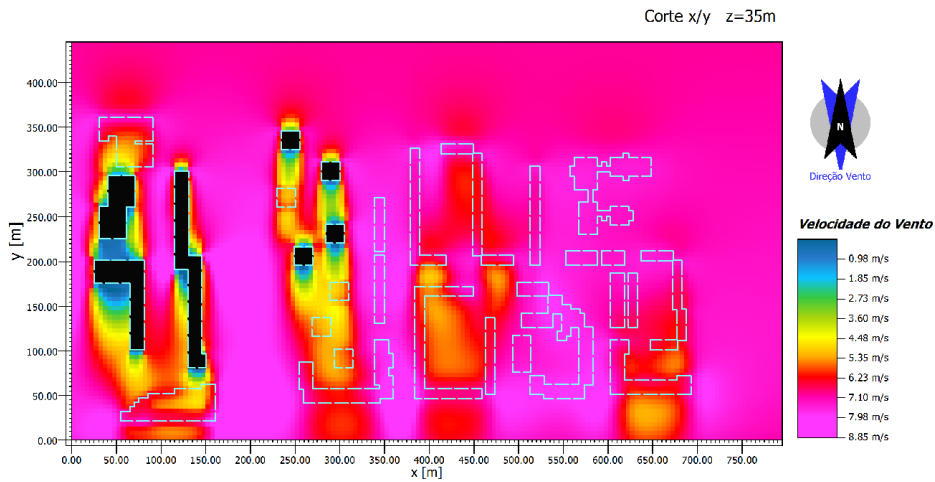
Nas direcções Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste observa-se uma grande presença de velocidades compreendidas entre os 4,0 e 5,5m/s, que se estende na direcção oposta ao rumo do vento. Apenas em correspondência dos edifícios mais expostos ao vento principal é que se realizam os efeitos de aceleração, principalmente a partir dos 35m. O vento que sopra nestas direcções encontra no seu percurso um maior número de elementos de rugosidade dispostos de forma desfasada, resultando numa maior área frontal e na ausência de corredores de ventilação. De tal forma não se torna possível a parcial recuperação da velocidade inicial. Considerações análogas podem ser feitas para a direcção Este, mas, neste caso, os efeitos de aceleração são mínimos e localizados em pequenas zonas correspondentes aos edifícios Oeste da célula D, apenas no corte a 35m de altura.

As direcções mais favorecidas são as direcções Norte e Sul. No corte a 35m é possível identificar várias zonas de aceleração em correspondência da cobertura dos edifícios, onde a velocidade atinge até 10m/s. De facto, a área frontal dos obstáculos encontrados pelo

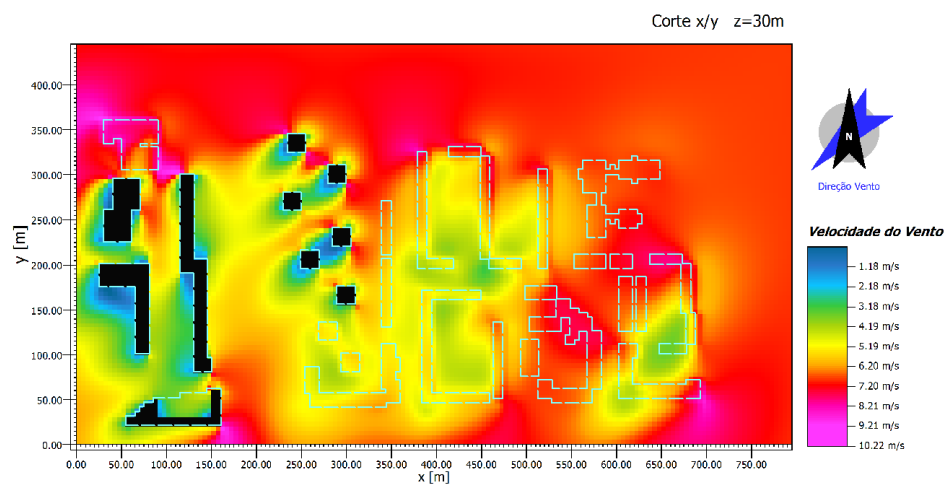
escoamento é mínima relativamente às outras direcções. O alinhamento quase simétrico dos edifícios relativamente ao eixo y resulta em corredores privilegiados de ventilação que permitem a aceleração do escoamento por Efeito Venturi.



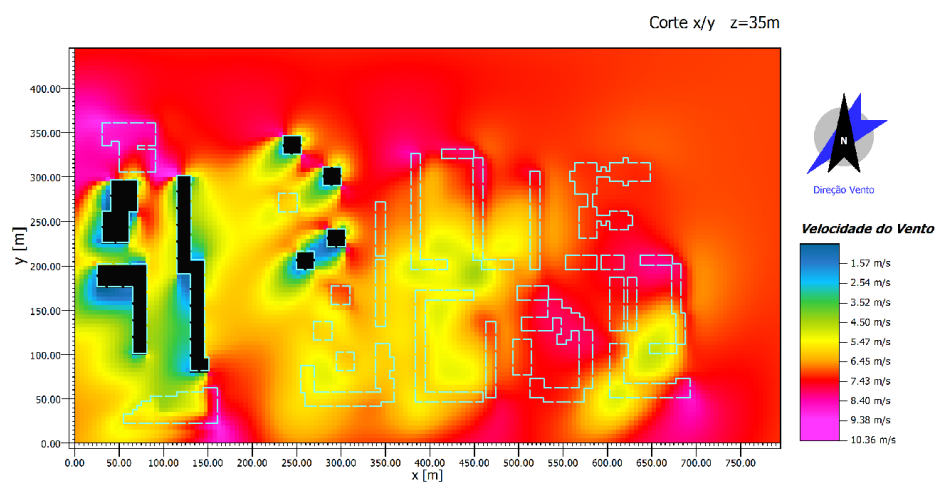
**Fig. 8-1** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Norte, obtida pelo ENVI-met.



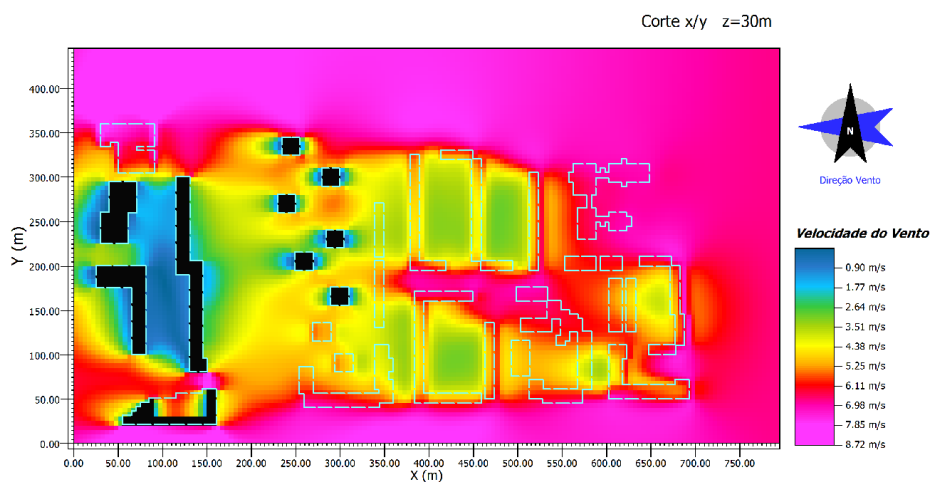
**Fig. 8-2** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Norte, obtida pelo ENVI-met.



**Fig. 8-3** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Nordeste, obtida pelo ENVI-met.

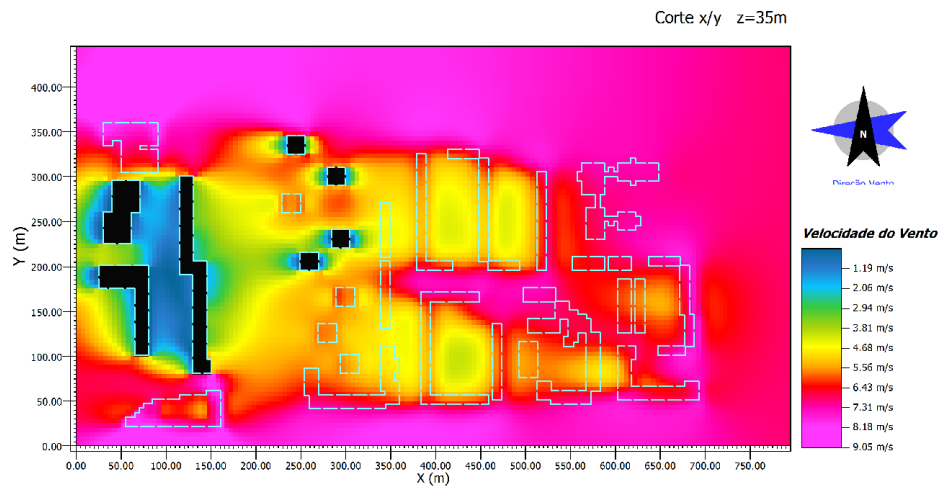


**Fig. 8-4** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Nordeste, obtida pelo ENVI-met.

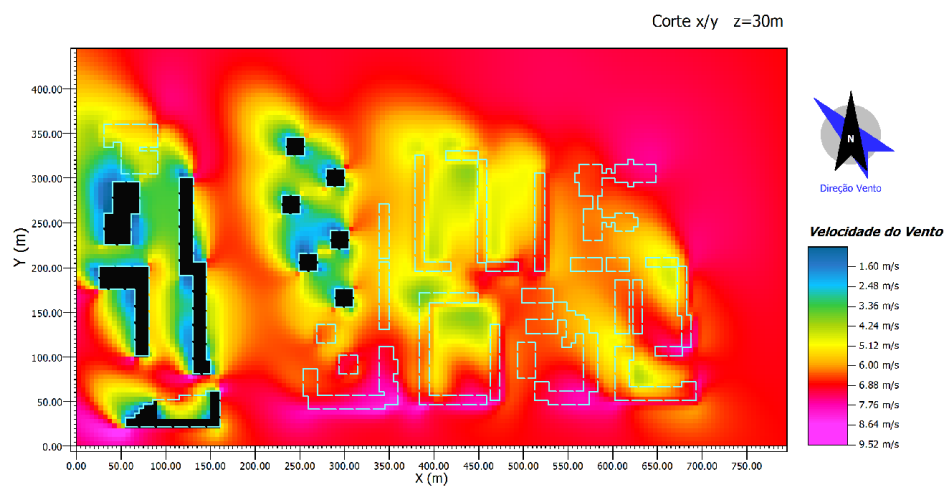


**Fig. 8-5** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Este, obtida pelo ENVI-met.

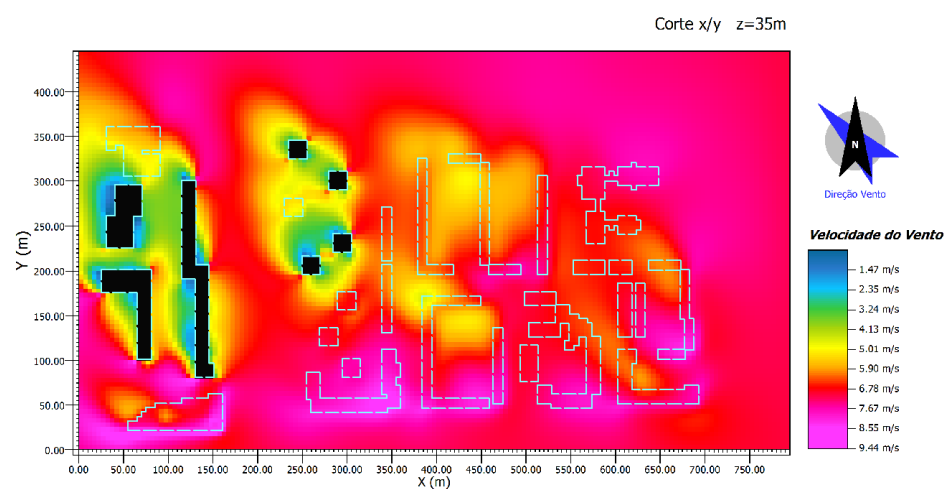




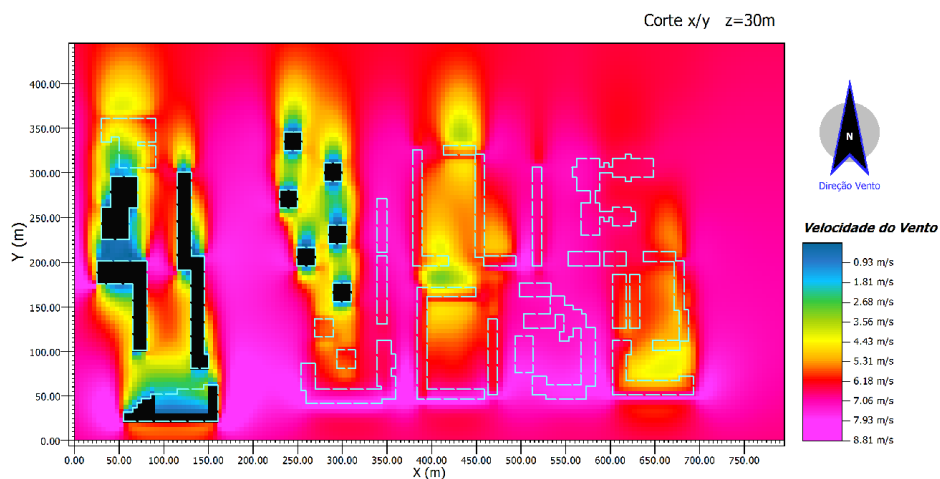
**Fig. 8-6** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Este, obtida pelo ENVI-met.



**Fig. 8-7** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Sudeste, obtida pelo ENVI-met.



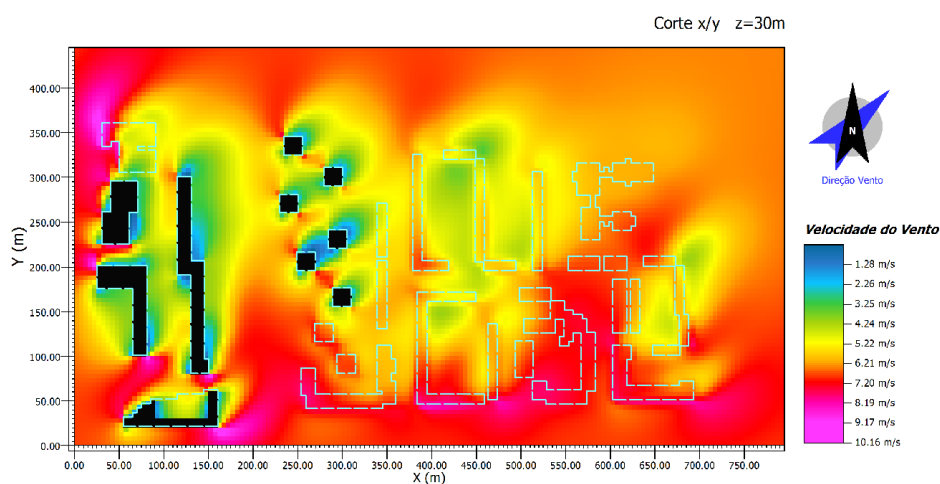
**Fig. 8-8** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Sudeste, obtida pelo ENVI-met.



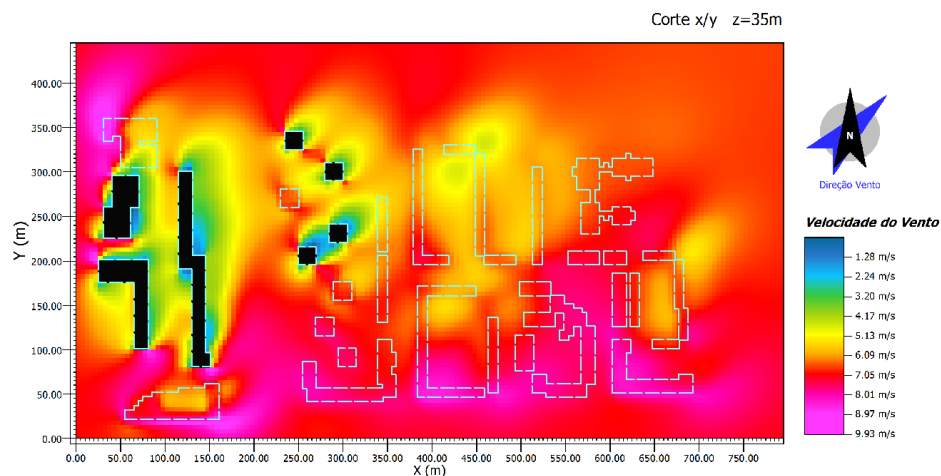
**Fig. 8-9** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Sul, obtida pelo ENVI-met.



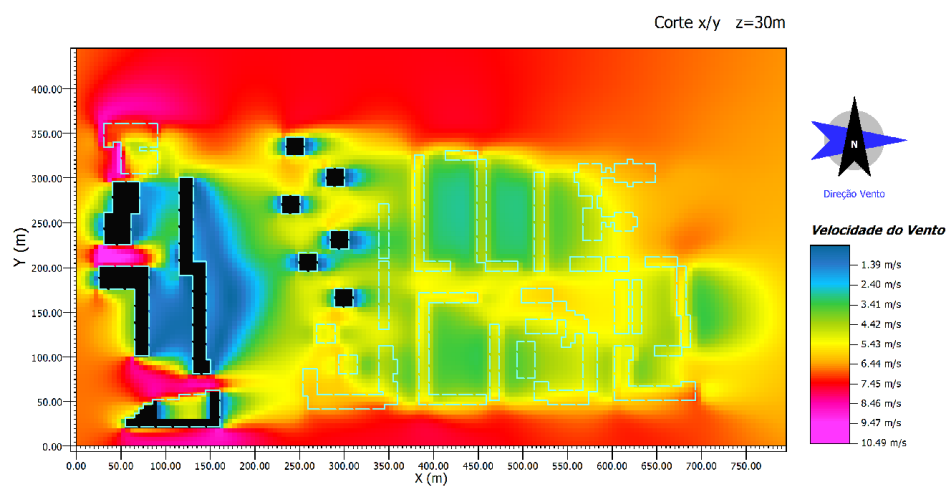
**Fig. 8-10** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Sul, obtida pelo ENVI-met.



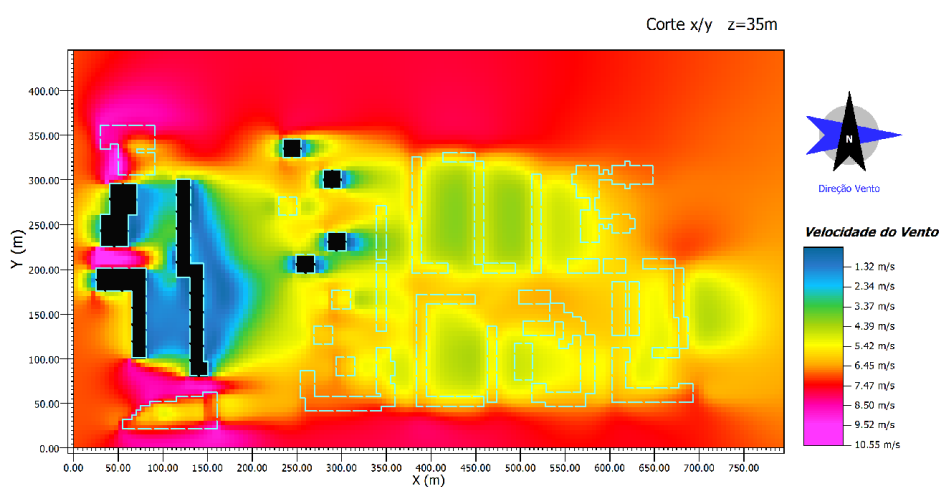
**Fig. 8-11** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Sudoeste, obtida pelo ENVI-met.



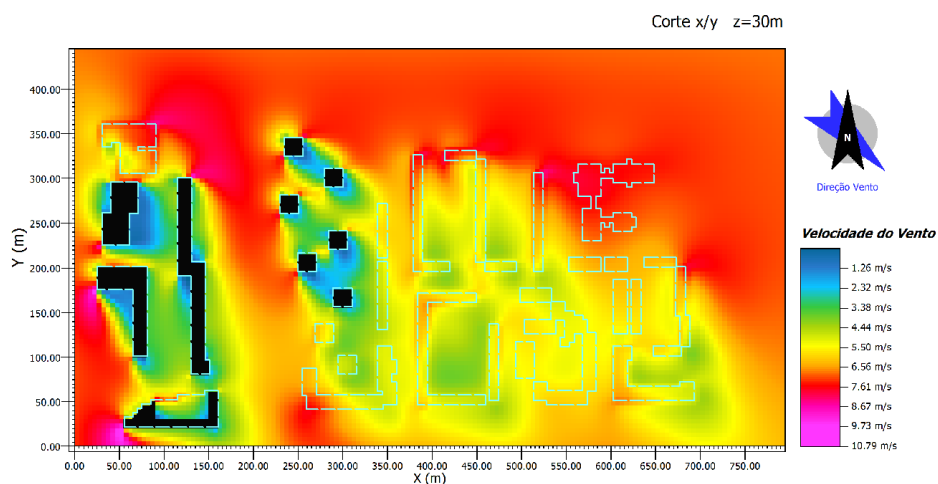
**Fig. 8-12** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Sudoeste, obtida pelo ENVI-met.



**Fig. 8-13** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Oeste, obtida pelo ENVI-met.



**Fig. 8-14** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Oeste, obtida pelo ENVI-met.



**Fig. 8-15** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 30 metros de altura, com vento que sopra de Noroeste, obtida pelo ENVI-met.



**Fig. 8-16** Representação gráfica da rajada de vento num plano horizontal a 35 metros de altura, com vento que sopra de Noroeste, obtida pelo ENVI-met.

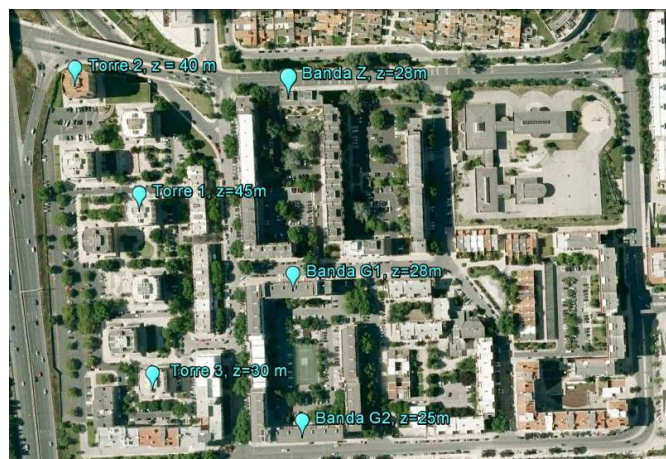
Através da análise global da velocidade do vento, foi possível identificar as zonas onde se realizam os efeitos de aceleração do escoamento, para alturas acima da cobertura típicas para a instalação de turbinas eólicas, e em função da incidência do vento. Para avaliar o potencial eólico num determinado ponto, logo estimar a produção de energia, é necessário considerar também a ocorrência por rumo de incidência. Nem sempre os pontos localizados na direcção do vento mais favorável correspondem aos pontos com maior potencial.

## 9 Estimativa da produção

---

A estimativa da produção energética eólica foi realizada em 6 pontos da área de estudo, reportados na *figura 9.1*.

Na célula A, escolheram-se os edifícios Torre 1, Torre 2 e Torre 3. A Torre 1 é localizada na parte central da célula e é caracterizada pela altura máxima de toda a área de estudo, igual a 45m. A Torre 2 é localizada na zona Nordeste da área de estudo, caracterizada pela ausência de obstáculos nas direcções com maior ocorrência por rumo de incidência, e tem uma altura de 40m. A Torre 3 é situada na zona Sudeste, tem uma altura de cerca 30m e é cercada por edifícios com altura igual a 25m. Na célula B, caracterizada por alturas dos edifícios menos variáveis, estudaram-se dois pontos localizados nas extremidades Norte e Sul (Banda Z, com altura de 28m, e Banda G2, com altura de 25m) e um ponto localizado na parte central da área de estudo (Banda G1, com altura de 28m).



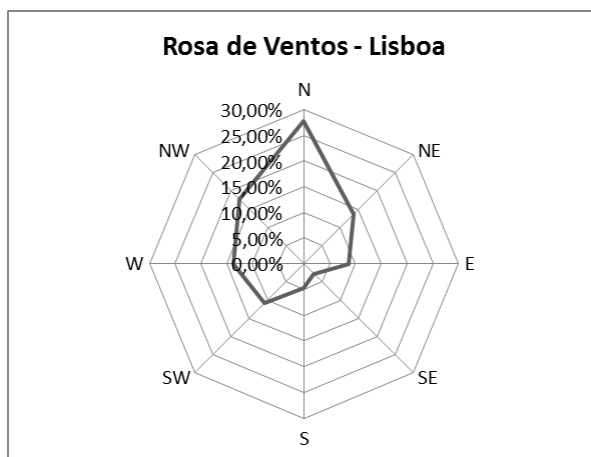
**Fig. 9-1** Vista aérea da área de estudo com indicação dos pontos onde se estimou a produção de energia eólica, obtida pelo *Google Earth*.

### 9.1 Normais Climatológicas

Na *figura 9.2*, reporta-se a rosa de ventos obtida com base nas Normais Climatológicas para Lisboa. Como se pode observar, em Lisboa, cerca de 60% dos ventos sopram de uma direcção compreendida entre Norte e Oeste.

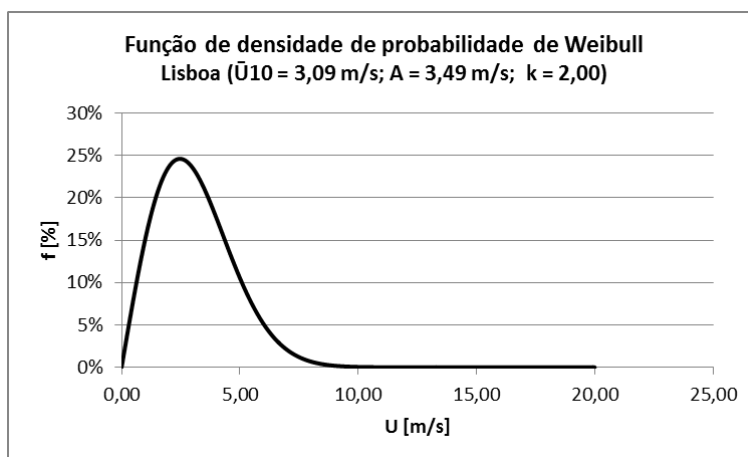
O conhecimento da velocidade média do vento num determinado período permite estimar (ainda que de uma forma não exacta) a distribuição da probabilidade de ocorrência de uma dada velocidade média, já que se sabe que pode ser descrita através da função de distribuição de *Weibull*. O valor do parâmetro de forma  $k$  está associado aos regimes de vento a nível

regional. Para as zonas costeiras do continente, é da ordem de 2,5 (um pouco superiores mais próximo do mar). Para Lisboa, este valor é compreendido entre  $1,84 < k < 2,15$ . No presente trabalho, decidiu-se utilizar um valor médio, correspondente a  $k = 2,00$ .



**Fig. 9-2 Rosa de ventos com base nas Normais Climatológicas para Lisboa (Instituto de Meteorologia - estação meteorológica do Aeroporto, período 1985-1997).**

Para determinar as velocidades médias anuais às cotas de interesse através da aplicação da Lei de Potência, utilizou-se um valor de velocidade de referência à cota de  $10m$ , obtido a partir dos valores médios anuais observados na estação meteorológica do Aeroporto, no período 1984-1997, igual a  $3,09m/s$ . Para cada velocidade média anual, o parâmetro de escala  $A$  foi calculado utilizando a função Gama, que, para o valor de  $k$  considerado, deu como resultado  $\Gamma(x = 1,5) = 0,89$ . A título de exemplo, reporta-se na figura seguinte a função de densidade de probabilidade de *Weibull* obtida para a velocidade média de referência  $U_{10} = 3,09m/s$  ( $A = 3,49m/s$ ;  $k = 2,00$ ).



**Fig. 9-3 Função de densidade de probabilidade de Weibull para Lisboa ( $U_{10}=3,09m/s$   $A=3,49m/s$ ;  $k=2,00$ ).**

## 9.2 Turbina T-Urban

Para estimar a produção de energia dos pontos escolhidos optou-se por utilizar a turbina eólica urbana *T-Urban*, cujas características foram descritas no *parágrafo 4.2.2*. a curva de potência é reportada na figura seguinte.

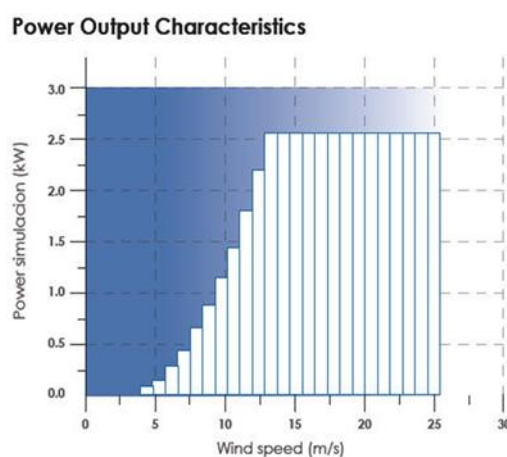


Fig. 9-4 Curva de potência da turbina eólica T-Urban (INETI).

A escolha desta turbina deve-se sobretudo por ser um produto desenvolvido por um laboratório nacional, o que possibilita estabelecer uma relação cooperação no sentido de se monitorizar em detalhe o funcionamento das turbinas em ambiente real. Permite também a existência de dados e informação fiável sobre a turbina, o baixo ruído de operação e a fácil integração em edifícios devido ao seu diâmetro de apenas 2,3m. Estas características implicam uma simplicidade de instalação estrutural e eléctrica.

## 9.3 Torre 1

Na *figura 9.5* são reportados os perfis verticais de velocidade normalizados para a Torre 1, relativos a todas as direcções principais do vento consideradas. As direcções mais favorecidas são as direcções Nordeste e Noroeste, uma vez que se realizam efeitos de aceleração já a partir de uma altura de cerca 2,5m acima da cobertura. O factor de aceleração máximo é igual a 1,15 na direcção Nordeste, a uma cota de 12,5m acima da cobertura. As direcções mais desfavorecidas são Este e Oeste, com valores do factor de aceleração da ordem de 0,9 entre os 2,5 e os 12,5m de altura.

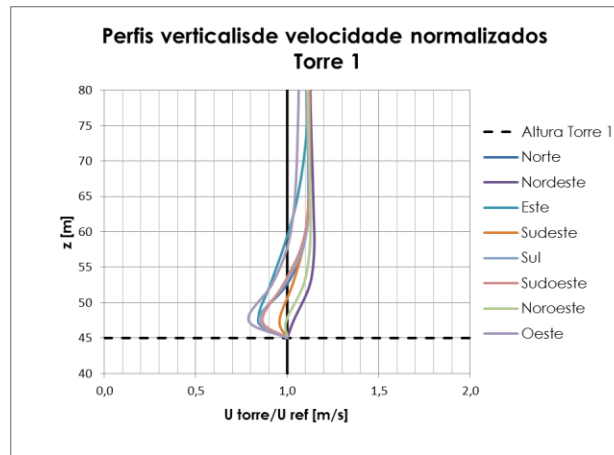


Fig. 9-5 Perfis verticais de velocidade normalizados na Torre 1, relativos a todas as direcções.

Na tabela seguinte são reportados os resultados em termos de energia anual produzida pela turbina eólica no ponto em exame correspondentes à cota de 5m acima da cobertura do edifício. Reportaram-se também os resultados relativos às cotas de 10 e 20m, se bem que a instalação de turbinas para estas cotas apresente mais limitações, para ter uma ideia de como possa variar a produção energética com a altura. Estes valores são comparados com a energia anual produzida pelo mesmo sistema nas mesmas cotas, mas sem considerar os factores de aceleração, isto é considerando o escoamento não perturbado pela presença dos obstáculos.

À cota de 5m ( $U_{(50)}$ ), a turbina produz 2196kWh/ano de energia, superior apenas de cerca 1% à energia produzida pelo escoamento não perturbado. Para a cota de 10m ( $U_{(55)}$ ), os efeitos de aceleração tem uma maior incidência, resultando num incremento de cerca 8% de energia produzida. Posicionando a turbina a 20m ( $U_{(65)}$ ), acima da cobertura, é possível incrementar a produção de cerca 670kWh/ano, correspondente ao 31% da energia produzida à cota de 5m.

Rumo do Vento	fv	H=5m			H=10m			H=20m		
		fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]
N	28%	1,00	603,39	603,39	1,08	695,08	643,59	1,12	805,13	718,87
NE	14%	1,12	334,85	298,98	1,15	366,73	318,90	1,14	406,06	356,20
E	9%	0,91	173,13	190,26	0,98	198,88	202,93	1,08	244,80	226,67
SE	3%	1,03	61,59	59,80	1,08	68,88	63,78	1,12	79,79	71,24
S	5%	0,98	101,22	103,28	1,08	118,98	110,16	1,12	137,82	123,05
SO	11%	0,98	229,07	233,75	1,07	266,77	249,32	1,12	311,90	278,48
W	14%	0,91	272,07	298,98	1,00	318,90	318,90	1,05	374,00	356,20
NW	18%	1,09	420,69	385,95	1,12	461,07	411,67	1,12	514,99	459,82
E total [MWh/ano]			2,20	2,17		2,50	2,32		2,87	2,59
Delta E				1%			8%			11%

Tab. 9-1 Energia anual produzida pela turbina na Torre 1, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.



## 9.4 Torre 2

Na *figura 9.6* são reportados os perfis verticais de velocidade normalizados para a Torre 2, relativos a todas as direcções principais do vento consideradas. Também neste caso, as direcções mais favorecidas são as direcções Nordeste e Noroeste, uma vez que se realizam efeitos de aceleração já a partir de uma altura de cerca 2,5m acima da cobertura. Nestas direcções, os valores máximos do factor de aceleração são iguais a 1,14 e 1,12, respectivamente, à cota de 12,5m. As direcções mais desfavorecidas são Sudeste e Sul, com valores do factor de aceleração da ordem de 0,9 entre os 2,5 e os 12,5m de altura.

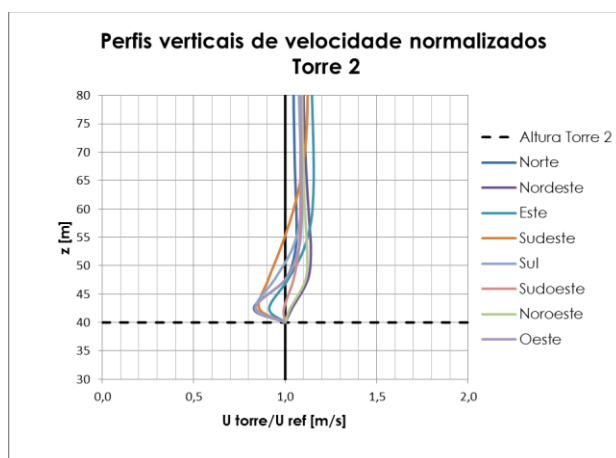


Fig. 9-6 Perfis verticais de velocidade normalizados na Torre 2, relativos a todas as direcções.

Os resultados de *tabela 9.2* mostram que, à cota de 5m ( $U_{(45)}$ ), a turbina produz 2107kWh/ano de energia, superior apenas de cerca o 4% à energia produzida pelo escoamento não perturbado. Para a cota de 10m ( $U_{(50)}$ ), os efeitos de aceleração tem uma maior incidência, resultando num incremento de cerca 8% de energia produzida. Posicionando a turbina a 20m ( $U_{(60)}$ ), acima da cobertura, é possível incrementar a produção de cerca 580kWh/ano, correspondente ao 27% da energia produzida à cota de 5m.

Rumo do Vento	fv	H=5m			H=10m			H=20m		
		fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]
N	28%	1,00	564,39	564,39	1,05	633,56	603,39	1,06	726,06	684,96
NE	14%	1,12	313,21	279,65	1,14	340,83	298,98	1,12	380,12	339,39
E	9%	1,01	179,74	177,96	1,10	209,28	190,26	1,15	248,38	215,98
SE	3%	0,91	50,90	55,93	0,97	58,00	59,80	1,07	72,63	67,88
S	5%	0,94	90,81	96,61	1,03	106,38	103,28	1,09	127,80	117,25
SO	11%	1,04	227,38	218,64	1,07	250,11	233,75	1,08	286,57	265,35
W	14%	1,00	279,65	279,65	1,07	319,91	298,98	1,09	369,94	339,39
NW	18%	1,11	400,71	361,00	1,12	432,27	385,95	1,10	481,94	438,13
E total [MWh/ano]		2,11		2,03		2,35	2,17		2,69	2,47
Delta E			4%			8%			9%	

Tab. 9-2 Energia anual produzida pela turbina na Torre 2, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.

## 9.5 Torre 3

Na *figura 9.7* são reportados os perfis verticais de velocidade normalizados para a Torre 3, relativos a todas as direcções principais do vento consideradas. As direcções mais favorecidas são as direcções Sudeste e Sudoeste, uma vez que se realizam efeitos de aceleração já a partir de uma altura de cerca 2,5m acima da cobertura. Nestas direcções, os valores máximos do factor de aceleração são iguais a 1,14 e 1,12, respectivamente, à cota de 17,5m. Nas restantes direcções, excepto a direcção Sul, os efeitos de aceleração se realizam apenas a partir de cotas compreendidas entre 17,5 e 25m.

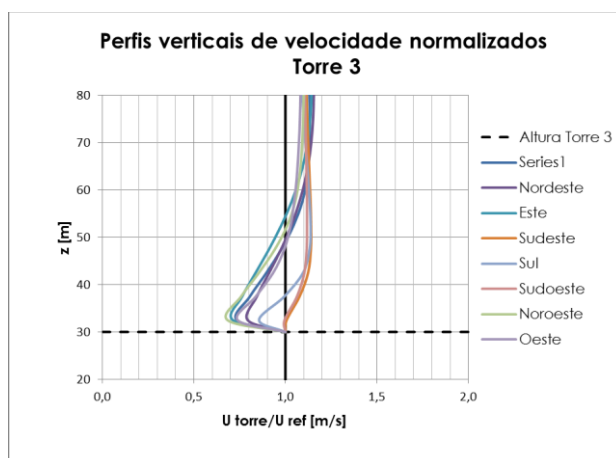


Fig. 9-7 Perfis verticais de velocidade normalizados na Torre 3, relativos a todas as direcções.

Os resultados de *tabela 9.3* mostram que, à cota de 5m ( $U_{(35)}$ ), a turbina produz 1443kWh/ano de energia, inferior de cerca o 15% à energia produzida pelo escoamento não perturbado. Apenas à cota de 20m ( $U_{(50)}$ ) os efeitos de aceleração determinam um incremento de energia produzida, de cerca 4%. Posicionando a turbina a 20m acima da cobertura, é possível incrementar a produção de cerca 830kWh/ano, correspondente ao 58% da energia produzida à cota de 5m.

Rumo do Vento	fv	H=5m			H=10m			H=20m		
		fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]
N	28%	0,81	382,58	472,32	0,90	467,29	519,21	1,04	627,53	603,39
NE	14%	0,84	196,59	234,03	0,91	234,11	257,27	1,03	307,95	298,98
E	9%	0,76	113,19	148,93	0,84	137,52	163,71	0,98	186,45	190,26
SE	3%	1,08	50,55	46,81	1,12	57,63	51,45	1,14	68,17	59,80
S	5%	0,99	80,04	80,85	1,10	97,76	88,87	1,14	117,74	103,28
SO	11%	1,06	193,95	182,97	1,10	221,25	201,13	1,12	261,80	233,75
W	14%	0,84	196,59	234,03	0,93	239,26	257,27	1,03	307,95	298,98
NW	18%	0,76	229,60	302,11	0,85	282,29	332,11	1,01	389,81	385,95
E total [MWh/ano]		1,44	1,70		1,74	1,87		2,27	2,17	
Delta E			-15%			-7%			4%	

Tab. 9-3 Energia anual produzida pela turbina na Torre 3, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.

## 9.6 Banda Z

Na *figura 9.8* são reportados os perfis verticais de velocidade normalizados para a Banda Z, relativos a todas as direcções principais do vento consideradas. As direcções mais favorecidas são as direcções Noroeste, Norte e Nordeste, uma vez que se realizam efeitos de aceleração já a partir de uma altura de cerca  $5,0m$  acima da cobertura. O factor de aceleração máximo é igual a 1,15 na direcção Noroeste, a uma cota de  $9,5m$  acima da cobertura. Nas restantes direcções, os efeitos de aceleração se realizam apenas a partir de cotas compreendidas entre 17 e  $25m$ .

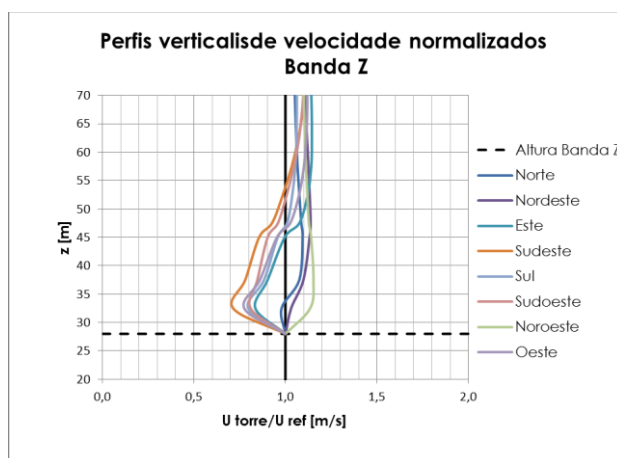


Fig. 9-8 Perfis verticais de velocidade normalizados na Banda Z, relativos a todas as direcções.

Os resultados de *tabela 9.4* mostram que, à cota de  $5m$  ( $U_{(33)}$ ), a turbina produz  $1541kWh/ano$  de energia, inferior de cerca o 6% à energia produzida pelo escoamento não perturbado. À cota de  $10m$  ( $U_{(38)}$ ), os efeitos de aceleração determinam um incremento de energia produzida de apenas o 1%, enquanto à cota de  $20m$  ( $U_{(48)}$ ), tal incremento é igual ao 7%. Posicionando a turbina a  $20m$  acima da cobertura, é possível incrementar a produção de cerca  $730kWh/ano$ , correspondente ao 47% da energia produzida à cota de  $5m$ .

Rumo do Vento	fv	H=5m			H=10m			H=20m		
		fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]
N	28%	0,98	445,76	454,86	1,08	540,99	500,92	1,09	640,53	587,64
NE	14%	1,03	232,14	225,38	1,10	273,02	248,20	1,14	331,94	291,17
E	9%	0,84	120,48	143,42	0,90	142,15	157,95	1,08	200,12	185,29
SE	3%	0,71	32,00	45,08	0,78	38,72	49,64	0,93	54,16	58,23
S	5%	0,80	62,29	77,86	0,88	75,45	85,74	1,01	101,59	100,59
SO	11%	0,81	142,73	176,21	0,85	164,94	194,05	0,96	218,54	227,65
W	14%	0,77	173,54	225,38	0,86	213,45	248,20	1,03	299,91	291,17
NW	18%	1,14	331,68	290,94	1,15	368,47	320,41	1,13	424,74	375,88
E total [MWh/ano]			1,54	1,64		1,82	1,81		2,27	2,12
Delta E				-6%			1%			7%

Tab. 9-4 Energia anual produzida pela turbina na Banda Z, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.

## 9.7 Banda G1

Na *figura 9.9* são reportados os perfis verticais de velocidade normalizados para a Banda G1, relativos a todas as direcções principais do vento consideradas. Neste caso, não existem direcções particularmente favorecidas, uma vez que os factores de aceleração se realizam apenas a partir de cotas compreendidas entre os 12 e os 25m acima da cobertura. O factor de aceleração máximo é igual a 1,15 na direcção Noroeste, a uma cota de 9,5m acima da cobertura. Nas restantes direcções, os efeitos de aceleração se realizam apenas a partir de cotas compreendidas entre 17 e 25m.

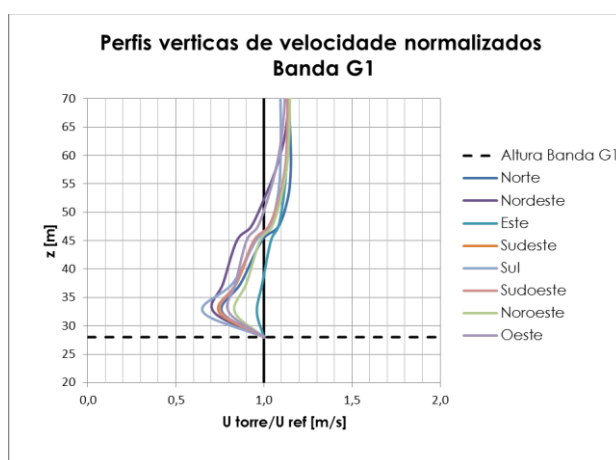


Fig. 9-9 Perfis verticais normalizados na Banda G1, relativos a todas as direcções.

Os resultados de *tabela 9.5* mostram que, à cota de 5m ( $U_{(33)}$ ), a turbina produz 1281kWh/ano de energia, inferior de cerca o 22% à energia produzida pelo escoamento não perturbado. Apenas à cota de 20m ( $U_{(48)}$ ), os efeitos de aceleração determinam um incremento de energia produzida, de cerca 3%. Posicionando a turbina a 20m acima da cobertura, é possível incrementar a produção de cerca 900kWh/ano, correspondente ao 70% da energia produzida à cota de 5m.

Rumo do Vento	fv	H=5m			H=10m			H=20m		
		fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]
N	28%	0,76	345,69	454,86	0,87	435,80	500,92	1,08	634,65	587,64
NE	14%	0,71	160,02	225,38	0,77	191,12	248,20	0,93	270,79	291,17
E	9%	0,96	137,69	143,42	0,99	156,37	157,95	1,08	200,12	185,29
SE	3%	0,74	33,36	45,08	0,85	42,19	49,64	1,03	59,98	58,23
S	5%	0,65	50,61	77,86	0,82	70,31	85,74	1,04	104,61	100,59
SO	11%	0,75	132,15	176,21	0,84	163,00	194,05	1,03	234,47	227,65
W	14%	0,80	180,30	225,38	0,84	208,49	248,20	0,97	282,44	291,17
NW	18%	0,83	241,48	290,94	0,90	288,37	320,41	1,05	394,67	375,88
E total [MWh/ano]			1,28	1,64		1,56	1,81		2,18	2,12
Delta E				-22%			-14%			3%

Tab. 9-5 Energia anual produzida pela turbina na Banda G1, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.

## 9.8 Banda G2

Na *figura 9.10* são reportados os perfis verticais de velocidade normalizados para a Banda Z, relativos a todas as direcções principais do vento consideradas. As direcções mais favorecidas são as direcções Sudoeste, Sul e Sudeste, uma vez que se realizam efeitos de aceleração já a partir de uma altura de cerca 2,5m acima da cobertura. O factor de aceleração máximo é igual a 1,20 na direcção Sudoeste, a uma cota de 12,5m acima da cobertura. Nas restantes direcções, os efeitos de aceleração se realizam apenas a partir de cotas compreendidas entre 18 e 28m.

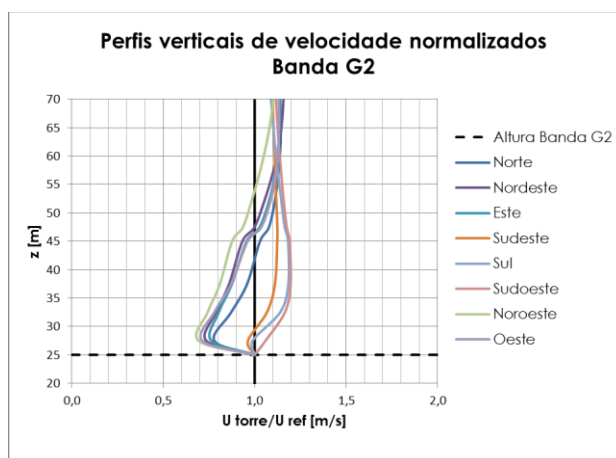


Fig. 9-10 Perfis verticais normalizados na Banda G2, relativos a todas as direcções.

Os resultados de *tabela 9.6* mostram que, à cota de 5m ( $U_{(30)}$ ), a turbina produz 1211kWh/ano de energia, inferior de cerca o 21% à energia produzida pelo escoamento não perturbado. Apenas à cota de 20m ( $U_{(45)}$ ), os efeitos de aceleração determinam uma produção de energia de valor igual à do escoamento não perturbado. Posicionando a turbina a 20m acima da cobertura, é possível incrementar a produção de cerca 830kWh/ano, correspondente ao 69% da energia produzida à cota de 5m.

Rumo do Vento	fv	H=5m			H=10m			H=20m		
		fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]	fa [-]	E [kWh/ano]	E ref [kWh/ano]
N	28%	0,78	330,92	424,25	0,87	410,91	472,32	1,03	581,32	564,39
NE	14%	0,74	155,56	210,21	0,79	184,88	234,03	0,93	260,08	279,65
E	9%	0,76	101,67	133,77	0,80	119,14	148,93	0,96	170,84	177,96
SE	3%	0,96	40,36	42,04	1,07	50,08	46,81	1,12	62,64	55,93
S	5%	0,99	71,89	72,62	1,14	92,17	80,85	1,18	114,00	96,61
SO	11%	1,06	174,21	164,35	1,17	214,07	182,97	1,19	260,18	218,64
W	14%	0,71	149,25	210,21	0,78	182,54	234,03	0,96	268,46	279,65
NW	18%	0,69	187,24	271,37	0,74	223,56	302,11	0,88	317,68	361,00
E total [MWh/ano]			1,21	1,53		1,48	1,70		2,04	2,03
Delta E				-21%			-13%			0%

Tab. 9-6 Energia anual produzida pela turbina na Banda G2, às cotas de 5, 10 e 20m acima da cobertura.

## 9.9 Conclusões

No presente capítulo, foi estimada a produção anual de energia eléctrica de uma turbina *T-Urban* instalada na cobertura de 6 edifícios da área de estudo, diferentes por tipologia, localização e altura. Considerou-se como altura de instalação da turbina, uma altura típica de 5m acima da cobertura. Os resultados mostram que a energia produzida pela turbina varia entre  $1,21 \leq MWh/ano \leq 2,20$ , sendo o valor máximo obtido na Torre 1, localizada na parte central da célula A e com altura de 45m, maior que todos os edifícios presentes na área de estudo. O valor mínimo foi obtido na Banda G2, localizada a sul da célula B e com altura igual a 25m.

Comparando os resultados obtidos na Torre 1 e na Torre 2, verifica-se que existe uma maior produção na Torre 1 de apenas 89kWh/ano. A Torre 2 é localizada numa área privilegiada respeito a Torre 1. De facto, não são presentes obstáculos nas direcções do vento compreendidas entre Noroeste e Este, resultando num incremento da produção energética relativamente ao escoamento não perturbado de cerca 4%. Para a Torre 1, o incremento é de apenas o 1%. Contudo, esta situação é balanceada pela maior altura da Torre 1 (cerca 5m), resultando numa produção energética não muito diferente. Estas considerações não são validas para a Torre 3, onde a energia produzida é de cerca 36% da energia produzida na Torre 1. Isto explica-se pela menor altura (cerca 15m), por ser localizada em correspondência de direcções do vento com uma baixa frequência de ocorrência, e por ser cercada por edifícios com alturas próximas da própria altura.

Comparando os resultados obtidos na Banda Z e na Banda G1, observa-se que a redução em termos de produção energética entre a extremidade Norte da célula B e a zona central da área de estudo é igual a cerca 260kWh/ano, correspondente a 17%. Em nenhum caso a produção é maior que a respectiva produção para o escoamento não perturbado, verificando-se na Banda G1 e na Banda G2, uma redução de cerca 22%.

Se se considera que em Portugal o consumo doméstico anual de energia eléctrica por consumidor é igual a cerca de 2530,7kWh e que o tamanho médio do agregado familiar corresponde a 2,58 pessoas, estima-se que o consumo doméstico anual de energia eléctrica por família seja de cerca 6,5MWh/ano (INE, 2011). Isto implica que a energia produzida nos casos analisados seja suficiente para satisfazer entre 19 ~ 34% das necessidades de energia eléctrica de um agregado familiar médio. Considerando que o cálculo da produção foi realizada para edifícios cujo número de pisos varia entre 5 e 9, e que tipicamente em cada piso alojam entre 2 e 4 famílias, então as percentagens acima referidas reduzem-se substancialmente. Por outro lado, pode imaginar-se de instalar um maior número de turbinas por cada edifício, de forma a multiplicar a produção energética pelo número de sistemas instalados. Contudo, esta operação resulta limitada pelo espaço disponível nas coberturas, sobretudo nos edifícios do tipo torre onde a produção é maior, e pelas necessidades de distanciamento mínimo entre os sistemas, ao fim de prevenir efeitos indesejados de interferência aerodinâmica.

## 10 Notas finais

---

As preocupações ambientais e os respectivos compromissos, bem como o desempenho energético do país, induzem uma mudança no paradigma energético, tornando-se crucial o aproveitamento de recursos renováveis locais. Surge então a ideia de integração de tecnologias de microgeração no Sistema Eléctrico Nacional, que acarreta inúmeras vantagens para o produtor/consumidor devido à redução das facturas de electricidade, obtenção de receitas (de acordo com a lei de remuneração vigente) e maior segurança no fornecimento. Quanto ao meio ambiente e sector energético, são diminuídas as perdas associadas à distribuição, são evitados avultados investimentos em centrais e na rede e são diminuídos os gases prejudiciais.

Segundo uma análise da possível evolução do mercado das turbinas eólicas urbanas até 2020, baseada nos padrões de crescimento do mercado observados nos últimos anos e na opinião de expertos da indústria eólica, existem analogias com a evolução do mercado fotovoltaico. A taxa de crescimento registada nos últimos tempos continuará até 2015, atingindo a capacidade anual instalada de 400MW. Dentro deste período, os países e as associações internacionais serão capazes de estabelecer regulamentos e políticas mais rigorosas para regular o mercado e suportar os investimentos. A partir deste momento, prevê-se uma taxa de crescimento de 20%, que levará a uma capacidade instalada global de 5GW em 2020, e uma capacidade global instalada anualmente de 1000MW.

O potencial eólico em zonas urbanas é de caracterização difícil, devido à presença dos obstáculos e estruturas naturalmente existentes nas cidades. A sua presença causa efeitos de separação do escoamento, redução da velocidade do vento e turbulência elevada nas zonas acima e em redor dos edifícios. Esta dificuldade é reforçada pelos elevados custos das campanhas de medição do vento, as quais, sendo utilizadas universalmente para a caracterização do desempenho das grandes turbinas, se vêm inviabilizadas por motivos económicos no caso de micro-turbinas eólicas, facto que constitui uma importante barreira ao desenvolvimento de aproveitamentos urbanos da energia eólica.

No presente trabalho, foi realizada a avaliação do potencial eólico analisando as modificações induzidas pelos elementos de rugosidade sobre o campo de vento de uma área urbana com características morfológicas heterogéneas, de forma a individuar as mais favoráveis e quantificar a produção de energia. Foi escolhida uma parte do Bairro de Telheiras uma vez que os edifícios são caracterizados por uma ampla gama de formas e dimensões, agrupados em células distintas. A análise foi realizada utilizando um modelo numérico, *CFD*, validado mediante comparação dos resultados com ensaios experimentais em túnel de vento realizados nos laboratórios do LNEC. A validação confirmou a possibilidade de obter resultados satisfatórios, sem necessidade de considerar factores de correcção nos edifícios com altura mais elevada e circundados por elementos análogos por geometria e dimensão. A análise das zonas caracterizadas por alturas dos edifícios mais reduzidas foi descartada, uma vez que se conseguiu verificar o escasso potencial destas zonas, durante a fase de validação do modelo. O *software* de simulação possibilitou a realização de uma análise global do escoamento, virada a

definição de zonas correspondentes a coberturas dos edifícios onde ocorressem efeitos de aceleração do escoamento. Com base nos resultados da análise global do escoamento, foi quantificada a produção energética em 6 pontos da área de estudo, cuja escolha foi efectuada com o intuito de mostrar a influência no desempenho do sistema de áreas com diferente potencial eólico recorrendo à turbina *T-Urban* de potência nominal igual a  $2,5kW$ . Os resultados mostraram que a energia produzida variava entre  $1,21 \leq MWh/ano \leq 2,20$ , sendo o valor máximo obtido em correspondência de um edifício com altura predominante relativamente aos outros edifícios da área de estudo. Em edifícios com altura próxima da altura média foi observada uma menor capacidade de aceleração do escoamento. Verificou-se que a energia produzida nos casos analisados seja suficiente para satisfazer entre 19 ~ 34% das necessidades de energia eléctrica de um agregado familiar médio. Considerando que a estimativa foi realizada considerando grandes edifícios multifamiliares, este dado não se pode considerar satisfatório. Para incrementar a produção, pode-se pensar na instalação de um maior número de turbinas em cada edifício, de forma a multiplicar a produção energética. Contudo, esta operação é limitada pelo espaço disponível nas coberturas, sobretudo nos edifícios do tipo torre onde a produção é maior, e pelas necessidades de distanciamento mínimo entre os sistemas, ao fim de prevenir efeitos indesejados de interferência aerodinâmica.

Se por um lado foi verificado um escasso potencial na área de estudo, por outro foi possível mostrar que existem pontos onde se realizam efeitos de aceleração interessantes numa óptica de aproveitamento de energia eólica, pelo que se supõe que em áreas caracterizadas por valores de velocidade maiores, tais efeitos venham contribuir para incrementar a produção energética de forma significativa.





## Bibliografia

- ABB. (2011). *Quaderni di applicazione tecnica N.13: Impianti Eolici*. Obtido em 21 de Abril de 2013, de ABB Group:  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ca72690859c50914c1257937002944c0/\\$file/1SDC007112G0901.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ca72690859c50914c1257937002944c0/$file/1SDC007112G0901.pdf)
- Beller, C. (2009). *Urban Wind Energy- State of the Art 2009*. Risø DTU.
- Bentham, T., & Britter, R. (2003). Spatially Averaged Flow Within Obstacle Arrays. *Atmospheric Environment*, 37, pp. 2037-2043.
- Best, M., A. Brown, P. C., Hollis, D., Middleton, D., Rooney, G., Thomson, D., et al. (2008). *Small-scale wind energy. Technical Report*. Devon: Met Office.
- Bruse, M. (12 de 2009). *ENVI-met V3.1 Online manual*. Obtido em 28 de 10 de 2013, de ENVI-met 3: <http://www.envi-met.com/>
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanayi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons.
- Castanho, A. S. (2012). *Avaliação experimental do conforto pedestre em ambiente urbano*. Lisboa: Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico.
- Grimmond, C., & Oke, T. (1998). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, 38, pp. 1262-1292.
- Heat, M., & Walshe, J. (2007). Estimating the Potential Yield of Small Building-mounted Wind Turbines. *Wind Energy*, 10, pp. 271-287.
- Henriques, J., Silva, F. M., Estanqueiro, A., & Gato, L. (2009). Design of a new urban wind turbine airfoil using a pressure-load. *Renewable Energy*, 34, pp. 2728-2734.
- Hosker, R. (1984). Flow and Diffusion Near Obstacles. *Atmospheric Science & Power Production*, 7, pp. 241-326.
- INE (Ed.). (2011). *Instituto Nacional de Estatística*. Obtido em 16 de 11 de 2013, de Portal do Instituto Nacional de Estatística:  
[http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_indicadores&indOcorrCod=0002089&contexto=bd&selTab=tab2](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0002089&contexto=bd&selTab=tab2)
- INETI. (s.d.). *T.Urban Technical Details*. Obtido em 16 de 11 de 2013, de T.Urban:  
<http://turban.ineti.pt/entrada.htm>
- Irwin, H. (1981). The Design of Spires for Wind Simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7, 361-366.

- Kaimal, J., & Finnigal, J. (1994). *Atmospheric Boundary Layer Flows*. New York: Oxford University Press.
- Lopes, A. (2003). *Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano*. Lisboa: Tese de Doutoramento em Geografia Física. Universidade de Lisboa.
- Macdonald, R. (2000). Modelling the Mean Velocity Profile in the Urban Canopy Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 97, pp. 25-45.
- Macdonald, R., Griffiths, R., & Hall, D. (1998). An Improved Method for the Estimation of Surface Roughness of Obstacle Arrays. *Atmospheric Environment*, 32(11), pp. 1857-1864.
- Manwell, J., McGowan, J., & Rogers, A. (2002). *Wind Energy Explained*. University of Massachusetts, Amherst, USA: John Wiley & Sons, LTD.
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy. Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Malapuram, Kerala: Springer.
- Meroney, R. (1982). Turbulent diffusion near building. *Engineering Meteorology*, 11, pp. 481-525.
- Mertens, S. (Março/Abril de 2002). Wind energy in urban areas, concentrator effects for wind turbines close to buildings. *Refocus*, pp. 22-24.
- Mertens, S. (2006). *Wind Energy in the Built Environment. Concentrator Effects of Buildings*. Multi-Science.
- Miranda, P. (2001). *Meteorologia e Ambiente. Fundamentos de meteorologia, clima e ambiente atmosférico*. Lisboa: Universidade Aberta.
- Nakamura, Y., & Oke, T. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west. *Atmospheric Environment*, 22, pp. 2691-2700.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Vancouver: Routledge.
- Panofsky, H., & Dutton, J. (1984). *Atmospheric turbulence*. New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Rafailidis, S. (1997). Influence of Building Areal Density and Roof Shape on the Characteristics Above a Town. *Boundary-Layer Meteorology*, 85, pp. 255-271.
- Reiter, S. (2010). Assessing wind comfort in urban planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37, 857-873.
- Simiu, E., & Scanlan, R. (1996). *Wind Effect on Structures*. Maryland: John Wiley & Sons, Inc.
- Sini, J., Anquetin, S., & Mestayer, P. (1996). Pollutant Dispersion and Thermal Effects in Urban Street Canyons. *Atmospheric Environment*, 30(15), pp. 2659-2677.
- Skilltech. (s.d.). *Tubo de Pitot Estático*. Obtido em 26 de 10 de 2013, de Airflow Brasil: <http://www.airflowbrasil.com.br/velocidadedoar/027.htm>

- Spera, D. (1994). *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*. New York: ASME Press.
- Stankovic, S., Campbell, N., & Harries, A. (2009). *Urban Wind Energy*. USA: Earthscan.
- Wilson, D. (1979). Flow patterns over flat-roofed buildings and application to exhaust stack design. *ASHRAE Transactions*, 85, pp. 284-295.
- WWEA. (2013). *Small Wind Energy Report 2013*. World Wind Energy Asociacion.

